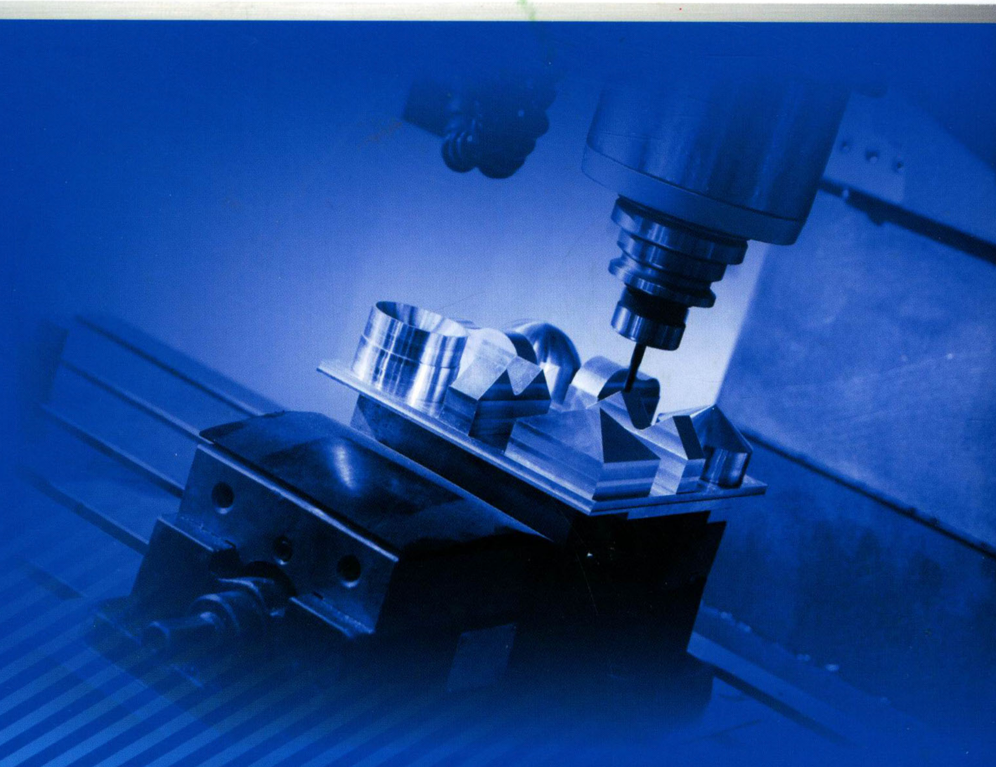
普通高等教育“十三五”规划教材

数控加工技术

NC Machining Technology

周　丹　主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

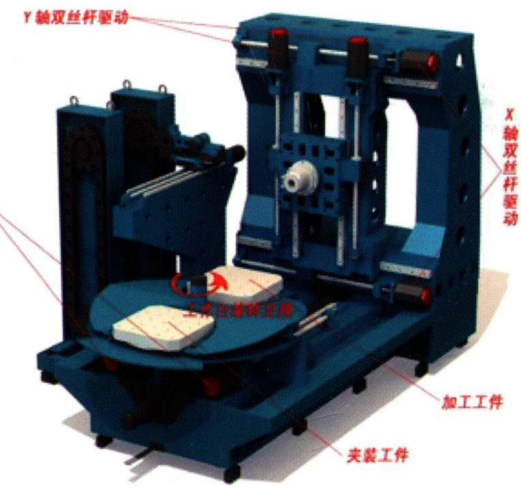


图 1 卧式数控铣床

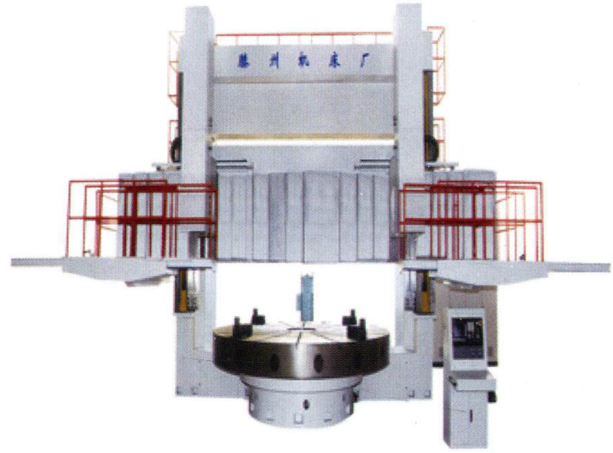


图 2 双柱式数控立式车床

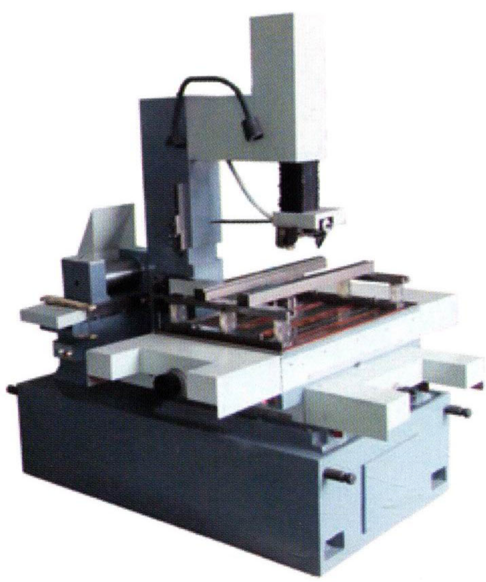


图 3 数控线切割机床

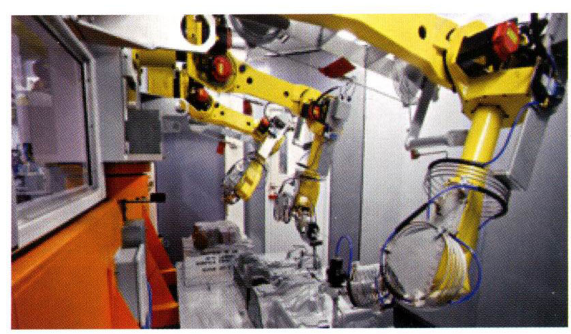


图 4 工业机器人

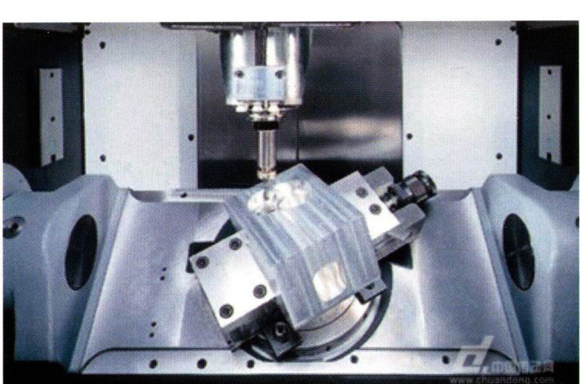


图 5 数控加工中心



图 6 三坐标测量机

普通高等教育“十三五”规划教材

数控加工技术

主　编　周　丹

副主编　杨　涛　李　琴　李文俐

参　编　谭兴强　杨光春　张学刚

主　审　谢永春　黄小兵

机 械 工 业 出 版 社

本书以“理论与实际一体化”为目标，系统地介绍了数控技术概念，数控机床的特点、分类和数控技术的发展趋势，计算机数控系统，数控插补原理及数据处理，数控编程技术，数控机床计算机辅助编程，数控机床管理，以及数控机床编程技术实验等内容，每章均附有知识要点、知识拓展和本章小结，以及一定数量的思考题与习题。

本书立足于数控理论知识和实际应用技术的结合，以应用为本，融工艺、编程、操作、数控机床维护管理、数控技术实验于一体。内容全面、丰富，重点突出，强调了知识的综合应用，力求体现实用性。

本书可作为普通高等教育机械类学生的专业课或选修课教材，也可作为广大自学者及工程技术人员的参考书，对从事数控加工技术的科技人员也有一定的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

数控加工技术/周丹主编. —北京：机械工业出版社，2017.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-57337-1

Ⅰ.①数…　Ⅱ.①周…　Ⅲ.①数控机床－加工－高等学校－教材　Ⅳ.①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 162366 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：余　皞　责任编辑：余　皞　王　良

责任校对：刘雅娜　封面设计：张　静

责任印制：李　昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 14.75 印张 · 356 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-57337-1

定价：40.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机 工 官 网：www. cmpbook. com

机 工 官 博：weibo. com/cmp1952

教育服务网：www. cmpedu. com

金 书 网：www. golden-book. com

封面无防伪标均为盗版

前　　言

数控技术是制造自动化的基础，是现代制造与装备的灵魂与核心，是国家工业和国防工业现代化的重要标志，关系到国家战略，能够体现一个国家的综合国力。加大对数控高端科技领域的拓展，实现由制造大国到制造强国的转变，就要重视数控领域工程技术人才的培养。

为了适应国民经济发展对数控技术人才的需要，以及高等院校的教学要求，作者通过多次调研，根据企业对数控人才知识结构的需求，编写了本书。本书力求全面反映数控机床的基本知识和最新技术成就，立足于理论与实际应用技术的结合，融工艺、编程、操作、原理、机械结构和设备维护于一体，取材和叙述上力求层次分明及合理，以内容的系统性、实用性和完整性，更好地适应数控技术人才培养的需求。

本书以数控加工技术为主线顺序展开，共分为 8 章。第 1 章介绍数控系统的组成、工作原理，数控机床的种类和应用范围及现代数控技术的发展；第 2 章介绍数控系统的轨迹控制原理，重点介绍了逐点比较法、数字积分法、数据采样法等几种插补算法，以及数控技术的刀具进给速度和加减速控制；第 3 章介绍数控编程中的数据处理，针对平面轮廓切削点的计算和数控加工中刀具中心位置的数据处理进行了详细论述；第 4 章和第 5 章介绍数控编程方法，以数控车床和数控铣床为例，按照先工艺后编程的数控加工技术规律组织教学内容。第 6 章介绍数控机床计算机辅助编程，对常用的 MasterCAM 软件以实例方式进行综合介绍，使数控加工和数控图形编程项目间前后关联，形成一个有机整体。第 7 章介绍数控机床的管理，对设备的保养、维护和故障诊断进行讲解。第 8 章将数控机床编程技术实验划分为五项内容，层次递进，在实验中将实践所涉及的知识和技术进行了充分运用，发挥理论与实际相结合的特点。本书力求简单实用，使读者一目了然地快速掌握书中内容，为读者掌握数控加工技能并快速进阶提供了捷径。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、工业设计、机械电子工程、材料成形及控制工程等专业的理论教学用书，也可供从事数控机床设计和研究的工程技术人员参考。

本书由周丹担任主编，杨涛、李琴、李文俐担任副主编。其中第 1、4 章以及各章的知识拓展由周丹编写，第 5 章由杨涛编写，第 2 章、第 3 章由李琴编写，第 6、7、8 章由李文俐编写，谭兴强、杨光春编写了本书各章的知识要点和小结，张学刚整理了其中部分图片，王鹏飞对其中部分案例做了优化。全书由周丹统稿和定稿，攀枝花学院教授谢永春、机械工程学院院长黄小兵主审。

在本书的编写过程中，收集了近期国内外有关数控发展和应用的材料，参考了大量的教材，咨询了许多同行专家，编者在此对为本书出版提供了帮助的同仁表示衷心的感谢。限于编者水平及经验，书中难免存在一些错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编　者

目　　录

前　言

第 1 章　数控机床概述 …… 1

1. 1　数控机床的概念及组成 …… 1
1. 2　数控机床加工零件的过程 …… 3
1. 3　数控机床的分类 …… 6
1. 4　数控机床的产生和发展 …… 9
思考题与习题 …… 14

第 2 章　数控编程中的数值计算 …… 15

2. 1　平面轮廓切削点的计算 …… 16
2. 2　平面轮廓刀具中心位置的计算 …… 20
思考题与习题 …… 22

第 3 章　计算机数控系统 …… 24

3. 1　概述 …… 24
3. 2　CNC 系统的硬件结构 …… 28
3. 3　CNC 系统的软件结构 …… 31
3. 4　CNC 装置的插补原理 …… 34
思考题与习题 …… 62

第 4 章　数控车削编程 …… 64

4. 1　数控车床概述 …… 64
4. 2　数控车床刀具系统 …… 67
4. 3　数控车削加工工艺 …… 71
4. 4　数控车削编程 …… 77
思考题与习题 …… 101

第 5 章　数控铣削编程 …… 103

5. 1　数控铣削概述 …… 103
5. 2　数控铣床（加工中心）刀具系统 …… 119
5. 3　数控铣削加工工艺 …… 122
5. 4　数控铣削编程 …… 134

思考题与习题…… 155

第 6 章　数控机床计算机辅助编程…… 158

6.1　计算机辅助编程简介 …… 158
6.2　MasterCAM 数控编程 …… 159
6.3　MasterCAM 系统及其应用 …… 167
6.4　2.5 轴加工 …… 179
6.5　曲面加工 …… 188
6.6　MasterCAM 综合应用实例 …… 192
思考题与习题…… 195

第 7 章　数控机床的管理…… 196

7.1　数控机床管理的基本要求 …… 196
7.2　数控机床的选用 …… 199
7.3　数控机床的维护和保养 …… 201
7.4　数控机床故障诊断与处理 …… 204
思考题与习题…… 217

第 8 章　数控机床编程技术实验…… 218

8.1　拆装（认识）小型数控机床实验 …… 218
8.2　数控系统的原理及组成实验 …… 219
8.3　数控插补原理实验 …… 222
8.4　数控代码手工编程仿真模拟实验 …… 224
8.5　利用 MasterCAM 软件自动编程加工实验 …… 225

参考文献…… 227

第 1 章　数控机床概述

【知识要点】

1. 数控机床的基本概念。
2. 数控机床的组成。
3. 数控机床的工作原理。
4. 数控机床的分类。

1.1　数控机床的概念及组成

随着“工业 4.0”时代的到来，未来我国依靠大规模工业化生产高性价比产品的比较优势将被显著削弱，这给机械制造业带来了革命性的变化，而数控技术已成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术，计算机辅助设计与制造（CAD/CAM），柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统（CIMS）、敏捷制造（AM）和智能制造（IM）等，都建立在数控技术之上。

1.1.1　数控机床的基本概念

数字控制技术（Numerical Control Technology），是指用数字代码形式的信息，按给定的工作程序、运动速度和轨迹，对被控对象进行自动操作的技术。它综合了计算机、微电子、自动控制、检测、精密机械和信息处理等技术，因而具有技术密集、多学科交叉、应用范围广的特点。数控技术不仅应用于金属切削机床，而且还应用于其他多种设备，如机器人、坐标测量机、编织机、电火花切割机、剪裁机等。

数控系统（Numerical Control System）是采用数控技术的控制系统。

数控机床（Numerical Control Machine Tools）是指采用数字形式信息控制的机床。具体来说，凡是用数字化的代码将零件加工过程中所需的各种操作和步骤以及刀具与工件之间的相对位移量等记录在程序介质上，送入计算机或数控系统经过译码、运算及处理，控制机床的刀具与工件的相对运动，加工出所需要的工件的一类机床即为数控机床。它全部或部分取代一般通用机床在加工零件时对机床的各种动作——起动、确定加工顺序、改变切削用量、主轴变速、选择刀具、切削液开停以及停机等人工控制。各类数控设备如图 1-1 所示。



图 1-1　各类数控设备

1.1.2 数控机床的组成

数控机床由数控系统和被控对象组成。但一台完整的数控机床，一般由控制介质、数控系统、伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成。如图 1-2 所示为闭环控制的数控机床的组成框图。

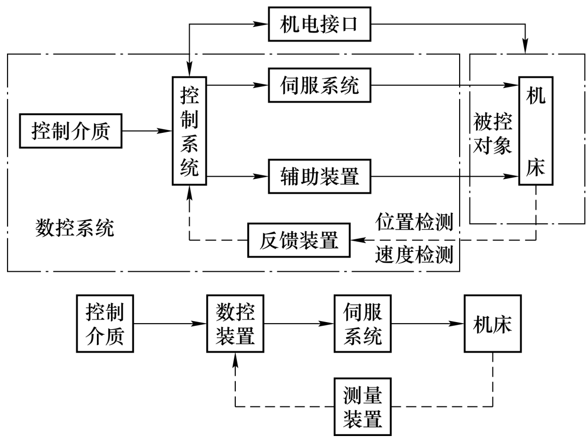


图 1-2 数控机床的组成框图

为了提高机床的加工精度，在上述系统中再加入一个测量装置（即图 1-2 中的虚线部分），这样就构成了闭环控制的数控机床框图。开环控制系统的工作过程是这样的：将控制机床工作台运动的位移量、位移速度、位移方向、位移轨迹等参量通过控制介质输入给机床数控装置，数控装置根据这些参量指令计算得出进给脉冲序列（包含有上述 4 个参量），然后经伺服系统转换放大，最后控制工作台按所要求的速度、轨迹、方向和距离移动。若为闭环系统，则在输入指令值的同时，反馈检测机床工作台的实际位移值，反馈量与输入量在数控装置中进行比较，若有差值，说明二者有偏差，则数控装置控制机床向着消除误差的方向运动[3]。

现将各组成部分简述如下：

1. 控制介质（Control Medium）

控制介质又称信息载体，是人与被控对象之间建立联系的媒介（或称程序介质、输入介质），上面存储着加工零件所需要的全部操作信息和刀具相对工件的移动信息。控制介质随着数控装置的类型而异，存放在软、硬磁盘等程序载体中，通过数控机床的输入装置，将加工程序信息读入数控装置中。

常用的控制介质有 SD 卡、磁盘等。还有的采用数码拨盘、数码插销或利用键盘直接将程序及数据输入。另外，随着 CAD/CAM 技术的发展，很多数控设备利用 CAD/CAM 软件在计算机上编程，然后通过计算机与数控系统通信，将程序和数据直接传送给数控装置。

2. 数控装置（Machine Control Unit）

数控装置是数控机床的中枢，接受并处理输入介质的信息，并将代码加以识别、储存、运算，输出相应的指令脉冲，经过功率放大驱动伺服系统，进而控制机床动作。它能自动阅读输入载体上事先给定的信息，并将其译码，从而使机床进给并加工零件。

现代的数控装置普遍采用通用或专用计算机作为主要硬件，包括微型计算机系统的基本组成部分，CPU、存储器、局部总线以及输入输出接口等；软件部分就是数控系统软件。

3. 伺服系统（Servo System）

伺服系统是数控机床的执行结构，是数控系统和机床本体之间的电气联系环节，由 4 部分组成：控制器、功率驱动装置、反馈装置和电动机。它的作用是把来自数控装置的脉冲信号经变换和放大后，驱动伺服电动机，再经机械传动机构驱动机床工作台或刀具，实现程序规定的坐标运动轨迹。每一个脉冲使机床移动部件产生的位移量称为脉冲当量。目前所使用的普通精度的机床一般取脉冲当量为：0.01mm/脉冲，较精密的机床取 0.001mm/脉冲或 0.005mm/脉冲。

数控机床的伺服系统中，常用的伺服驱动元件有功率步进电动机、电液脉冲马达、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。

4. 测量反馈装置（Feedback Transducer）

测量反馈装置也称反馈元件，主要用于闭环和半闭环系统。其作用是对实际位移、速度及当前的环境（如温度、振动、摩擦和切削力等因素的变化）参数加以检测，转变为电信号后反馈给数控装置中的比较器，通过比较得到误差值，并根据这个差值的方向和大小，通过伺服驱动装置去控制机床，纠正所产生的误差，直到差值为 0，运动停止。

数控系统中的检测装置分为位移、速度和电流三种类型。位置检测装置的精度直接决定了数控机床的加工精度。常用检测装置有旋转变压器、编码器、感应同步器、光栅、磁栅、霍尔检测元件等。

5. 机床（Machine Tools）

机床本体是实现制造加工的主要部件，有主运动部件、进给运动部件（工作台、拖板以及相应的传动机构）、支承件（立柱、床身等）以及特殊装置（刀具自动交换系统和工件自动交换系统）和辅助装置（如排屑装置等）。

数控加工是自动控制，不能像传统机床那样由人工进行调整、补偿，所以其设计要求比通用机床更严格，制造要求更精密。因而在数控机床设计时，采用了许多新的加强刚性、减小热变形、提高精度等方面的措施，使得数控机床的外部造形、整体布局、传动系统以及刀具系统等方面发生了很大的变化。

1.2　数控机床加工零件的过程

数控技术实现的前提是利用程序对加工设备精准控制，可以提高零件加工质量与工作效率。数控加工涉及数字信息技术、传感检测技术、自动化技术等，需要工作人员根据零件加工的实际需求，提前对加工程序进行编写，将其输入到计算机中，利用计算机辅助软件来对繁琐的控制程序进行运行，并对产生的加工数据做好存储与运算，来完成对机械加工过程的控制。

1.2.1　数控机床的工作流程

可用图 1-3 来描述数控设备的工作流程。*A* 为被加工物的图样，图样上的数据大致分为两类：几何数据和工艺数据。这些数据是指示给数控设备命令的原始依据（简称“指令”）。*B* 为控制介质（或程序介质、输入介质），通常用磁盘机、存储卡以及 RS232 串口通信等几

种作为记载指令的控制介质。*C* 为数据处理和控制的电路，通常是一台控制计算机，原始数据经过它处理后，变成伺服机构能够接受的位置指令和速度指令。*D* 为伺服机构（或伺服系统），可以把控制计算机（*C*）比喻为人的“大脑”，则伺服机构（*D*）相当于人的“手”和“足”，要求伺服机构必须无条件地执行“大脑”的意志。*E* 为数控设备。*F* 为加工的零件。这就是一般数控设备的工作流程。

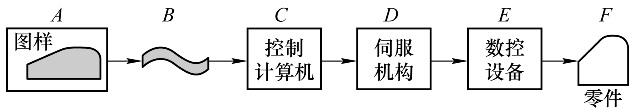


图 1-3 数控设备的传输工作形式

数控机床是采用数控技术的机械设备中最具有代表性的一种。它能够按照规定的数字化代码，把各种机械位移量、工艺参数、辅助功能（如刀具交换、切削液开与关等）表示出来，经过数控系统的逻辑处理与运算，发出各种控制指令，实现要求的机械动作，自动完成零件加工任务。在被加工零件或加工工序变换时，它只需改变控制的指令程序就可以实现新的加工。概括起来，采用数控机床加工有以下几方面的优点：

1）加工精度高，加工质量稳定、可靠性高。

2）数控系统具有充分的柔性，加工范围广，可以适应不同品种、规格和尺寸以及不同批量的形状复杂的工件加工。

3）降低了工人的劳动强度，生产效率得到提高，减少了辅助时间和机动时间。改善了劳动条件，有利于生产管理的现代化和机械加工综合自动化的发展。

在数控机床上加工零件时，要事先根据零件加工图样的要求确定零件加工路线、工艺参数和刀具数据，再按数控机床编程手册的有关规定编写零件数控加工程序，然后通过信息载体输入到数控系统，在数控系统控制软件的支持下，经过处理与计算后，发出相应的控制信号，通过伺服系统使机床按预定的轨迹运动，从而进行零件的切削加工。数控机床加工零件的流程如图 1-4 所示。

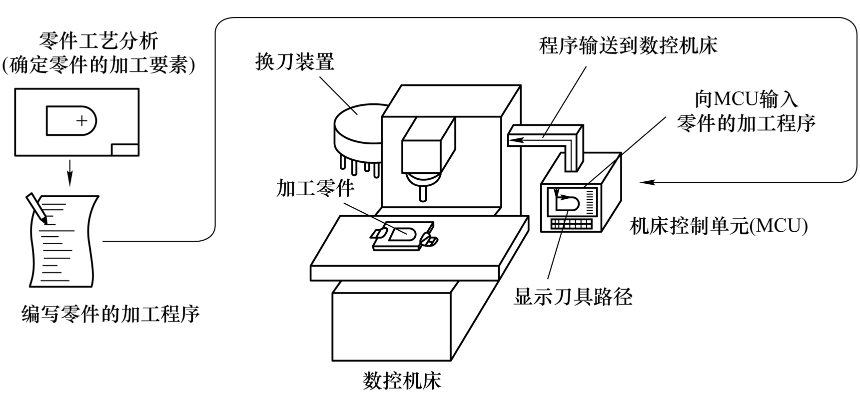


图 1-4 数控机床的工作流程

1.2.2 数控机床工作原理

利用数控机床进行加工时，最基本的信息和指令包括：各坐标轴的进给速度、进给方向和进给位移量，各状态控制的 I/O 信号等。数控机床的运行处于不断地计算、输出、反馈等

控制过程中，从而保证刀具和工件之间相对位置的准确性[4]。

在数控机床上加工零件的工作过程为：

1. 零件图工艺处理

拿到零件加工图样后，应根据图样，对工件的形状、尺寸、位置关系、技术要求进行分析，然后确定合理的加工方案、加工路线、装夹方式、刀具及切削参数、对刀点、换刀点，同时还要考虑所用数控机床的指令功能。

2. 数学处理

在工艺处理后，应根据加工路线、图样上的几何尺寸，计算刀具中心运动轨迹，获得刀位数据。如果数控系统有刀具补偿功能，则需要计算出轮廓轨迹上的坐标值。

3. 数控编程

根据加工路线、工艺参数、刀位数据及数控系统规定的功能指令代码及程序段格式，编写数控加工程序。程序编完后，可存放在控制介质（如 U 盘、磁卡）上。

4. 程序输入

数控加工程序通过输入装置输入到数控系统中。目前采用的输入装置主要有 USB 接口、RS232 接口、MDI 手动输入、分布式数字控制（Direct Numerical Control，DNC）接口、网络接口等。数控系统一般有两种不同的输入工作方式：一种是边输入边加工，DNC 即属于此类工作方式；另一种是一次将零件数控加工程序输入到计算机内部的存储器，加工时再由存储器一段一段地往外读出，USB 接口即属于此类工作方式。也可利用 CRT/MDI 方式对读入的数控加工程序进行编辑修改。

5. 译码

输入的程序中含有零件的轮廓信息（如直线的起点和终点坐标；圆弧的起点、终点、圆心坐标；孔的中心坐标、孔的深度等）、切削用量（进给速度、主轴转速）、辅助信息（换刀、切削液开与关、主轴顺转与逆转等）。数控系统以一个程序段为单位，按照一定的语法规则把数控程序解释、翻译成计算机内部能识别的数据格式，并以一定的数据格式存放在指定的内存区内。在译码的同时数控系统还完成对程序段的语法检查，一旦有错，立即发出报警信息。

6. 数据处理

数据处理程序一般包括刀具补偿、速度计算以及辅助功能的处理程序。刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿。刀具半径补偿的任务是根据刀具半径补偿值和零件轮廓轨迹计算出刀具中心轨迹。刀具长度补偿的任务是根据刀具长度补偿值和程序值计算出刀具轴向实际移动值。速度计算是根据程序中所给的合成进给速度计算出各坐标轴运动方向的分速度。辅助功能的处理主要完成指令的识别、存储、设标志，这些指令大都是开关量信号，现代数控机床可由 PLC 控制。

7. 插补（interpolation）

插补的任务就是根据刀具中心点沿各坐标轴移动的指令信息，计算出曲线段的一系列中间点，即数据点的密化工作。插补器向各轴发出的运动序列命令为其位置调节器的命令值，位置调节器将其与机床上位置检测元件测得的实际位置相比较，经过调节，输出相应的位置和速度控制信号，伺服系统根据信号驱动机床各轴运动，使刀具相对工件正确运动，加工出要求的工件轮廓。

8. 伺服控制与加工

伺服系统接受插补运算后的脉冲指令信号或插补周期内的位置增量信号，经放大后驱动伺服电动机，带动机床的执行部件运动，从而加工出零件。

1.3 数控机床的分类

目前，数控机床品种繁多，据不完全统计已有400多个品种规格。可以按照多种原则来进行分类。但归纳起来，常见的是以下4种分类方法。

1. 按工艺用途分类

（1）金属切削数控机床　这类机床和传统的通用机床种类一样，有车、铣、镗、钻、磨床等，带有刀库和能实现多工序加工的为铣镗加工中心和车削中心。铣镗加工中心主要完成铣、镗、钻、攻丝等工序的加工；车削中心以完成各种车削加工为主，也能完成铣平面、铣键槽及钻横孔等工序。此外，还有集钻、铣、镗、车、磨削等加工一体的万能加工中心。

（2）金属成形数控机床　这类机床是指使用挤、压、拉等成形工艺的数控机床，如数控回转头压力机、折弯机、弯管机、旋压机和数控组合压力机等。这类机床起步晚，但目前发展很快。

（3）数控特种加工机床　数控特种加工机床主要指数控线（电极）切割机、电火花成形机、激光切割机和快速成形机等。

2. 按数控机床的运动轨迹分类

按照能够控制的刀具与工件间相对运动的轨迹，可将数控机床分为点位控制数控机床、点位直线控制数控机床、轮廓控制数控机床等。数控系统的运动控制方式如图1-5所示。

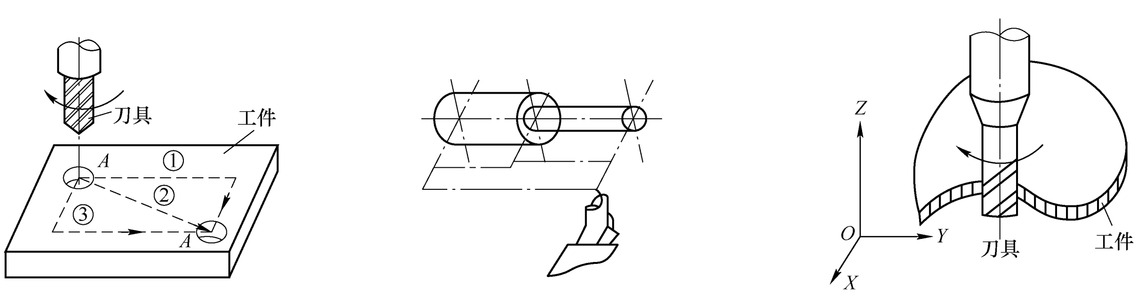


图1-5　数控系统的运动控制方式

a）点位控制方式　b）点位直线控制方式　c）轮廓控制方式

（1）点位控制（Point to Point Control Systems）　这类机床的数控装置仅控制机床移动部件从一个点精确地移动到另一个点，对轨迹不作控制要求，运动过程中不进行任何切削加工，至于两相关点之间的移动速度及路线则取决于生产要求。为了精确定位和提高生产率，首先快速移动到接近新的位置，然后降速使之慢速趋近定位点，以保证其定位精度。

点位控制系统多采用于孔加工的数控机床。这类机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控压力机、数控点焊机、数控折弯机和数控测量机等。

（2）点位直线控制（Point Linear Control Systems）　这类机床工作时，不仅要控制两相

关点之间的位置（即距离），还要控制两相关点之间的移动速度和路线（即轨迹），其路线一般都由和各轴线平行的直线段组成。它和点位控制数控机床的区别在于：被控对象不仅要实现由一个位置到另一个位置按直线轨迹精确移动，而且在移动过程中，还要进行加工，辅助功能比点位控制的数控机床多，例如，增加主轴转速控制、进给速度控制和刀具自动交换等功能。

目前具有这种运动控制的数控机床很少。这类机床主要有简易数控车床、数控镗床和数控铣床等。一般情况下，这类机床可以有两到三个可控轴，但一般同时控制轴数只有两个。相应的数控装置称之为点位直线控制装置。

（3）轮廓控制（Contouring Control Systems）　轮廓控制系统又称为连续控制系统或轨迹控制系统，其特点是能同时控制两个以上的轴，具有插补功能。加工时不仅要控制起点和终点，还要控制整个加工过程中每点的速度和位置，且能够边移动边加工。这样，各轴的运动按规定的比例关系相互配合，精确地协调起来进行连续加工，使机床加工出任意形状的曲线或曲面组成的复杂零件。

近年来，随着计算机技术的发展，软件功能不断完善，可以通过插补软件实现多坐标联动的轮廓控制。对于这类机床，根据同时控制坐标轴的数目可分为两坐标联动、两轴半联动、三坐标联动、多轴联动。两坐标联动是同时控制两个坐标轴实现二维直线、圆弧、曲线的轨迹控制。两轴半联动除了控制两个坐标轴联动外，还同时控制第三坐标轴作等距周期移动，可加工空间曲面。三坐标联动同时控制三个坐标轴联动，实现曲面的轨迹控制。多轴联动除了控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴外，还能同时控制一个或两个回转坐标轴，如工作台的旋转、刀具的摆动等，从而实现复杂曲面的轨迹控制。如图 1-6 所示为 2～5 轴坐标联动加工示意图[5]。

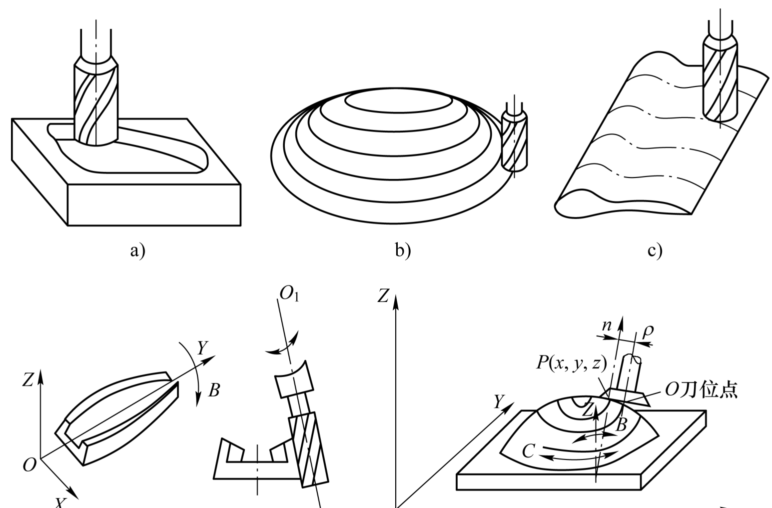


图 1-6　2～5 轴坐标联动加工示意图

a）两轴联动加工　b）两轴半联动加工　c）三轴联动加工　d）四轴联动加工　e）五轴联动加工

这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控磨床和特种加工机床等。它们取代了各种类

型的仿形加工机床，提高了加工精度和生产效率。

3. 按伺服系统的控制方式分类

数控机床按照对被控制量有无检测反馈装置可以分为开环和闭环两种。在闭环系统中，根据测量装置安放的位置又可以将其分为全闭环和半闭环两种。

（1）开环控制（Open-Loop Servo-Drive） 这类机床运动部件的位移没有检测反馈装置（图 1-7）。

数控装置发出的信号是单向的，系统稳定性好。驱动装置主要采用功率步进电动机，其精度主要决定于驱动元件和伺服电动机的性能，移动部件的速度与位移由输入脉冲的频率和脉冲数决定，位移精度主要决定于该系统各有关零部件的制造精度。工作过程是：输入的数据经过数控装置运算分配出指令脉冲，通过伺服机构（伺服元件常为步进电动机）使被控工作台移动。

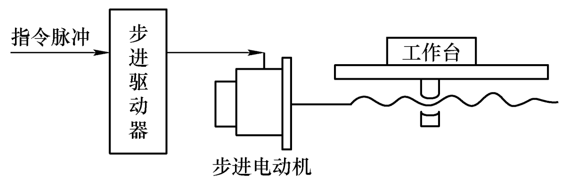


图 1-7 开环控制系统框图

开环控制具有工作稳定、调试方便、维修简单、成本较低等优点，但是系统对移动部件的误差没有补偿和校正，在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用，一般位置精度通常为 ±（0.01～0.02）mm，适用于经济型数控机床。

（2）全闭环控制（Closed-Loop Servo-Drive） 这类数控机床的特点是在机床的运动部件上安装有直线位移测量装置（图 1-8，将测量出的实际位移值反馈到数控装置中与输入的指令位移值相比较，用差值控制伺服电动机移动，直至差值为零，所以能实现运动部件的精确定位），理论上讲，闭环控制系统的运动精度主要取决于检测装置精度，而与传动链中误差无关，所以这种控制系统可以得到很高的加工精度。但由于它将丝杠螺母副及工作台导轨副这些大惯量环节放在闭环之内，所以闭环控制系统对机床结构的刚性、传动部件的间隙及导轨移动的灵敏性等都提出了严格的要求。全闭环控制数控机床的系统稳定性易受到影响，调试困难且结构复杂、价格昂贵，所以这类机床主要是一些精度要求较高的镗铣床、超精车床和加工中心等[6]。

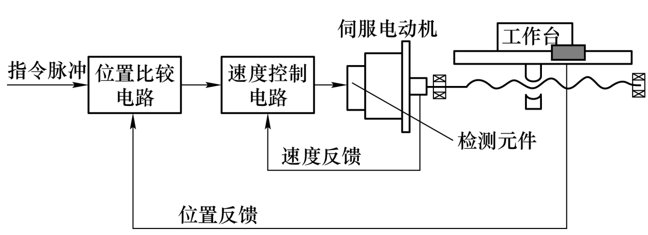


图 1-8 全闭环控制系统框图

（3）半闭环控制数控机床（Half-Closed-Loop Servo-Drive） 半闭环控制系统是在丝杠端部或进给电动机的轴上装有角位移检测装置，如圆光栅、光电编码器及旋转式感应同步器等。该系统不是直接测量工作台位移量，而是通过检测丝杠转角，间接地测量工作台位移量，然后反馈给数控装置。如图 1-9 所示。

这种控制系统实际控制的是丝杠的转动，而丝杠的螺母副的传动误差无法测量，只能靠

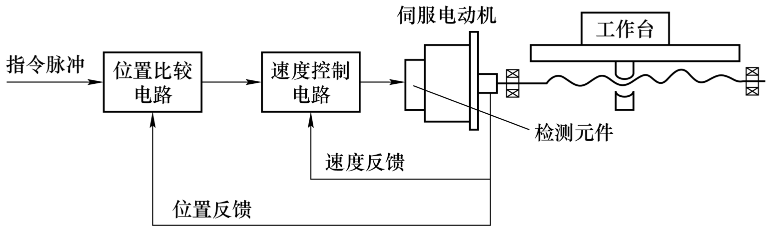


图 1-9　半闭环控制系统框图

制造保证，因而半闭环控制系统的精度低于闭环系统，价格也较全闭环系统便宜。由于角位移检测装置比直线位移检测装置结构简单且安装调试方便，因此可以利用精密滚珠丝杠，采用丝杠螺距误差的补偿措施，或通过软件定值补偿的方法来适当提高其精度。

4. 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平，通常把数控系统分为高、中、低三档。这种分类方法没有明确界限。不同国家、不同时期的含义也在不断发展变化。

（1）低档数控机床　即经济型数控机床。这类机床主要采用功能较弱、价格低廉的经济型数控装置，伺服进给驱动一般是由步进电动机实现的开环驱动，机械结构与传统机床结构差异不大，刚度与精度较低。能满足加工形状比较简单的直线、圆弧及螺纹加工。一般控制轴数在三轴以下，脉冲当量（分辨率）多为 10μm，快速进给速度在 10m/min 以下。

（2）中档型数控机床　中档型数控机床也称标准型数控机床，采用交流或直流伺服电动机实现半闭环驱动，在机械结构设计上充分考虑了强度、刚度、抗振性、低速运动平稳性、精度等方面的要求，能实现四轴或四轴以下联动控制。脉冲当量为 1μm，进给速度为 15 ~ 24m/min，一般采用 16 位或 32 位处理器，具有 RS232C 通信接口、DNC 接口和内装 PLC，具有图形显示功能及面向用户的宏程序功能。这类机床是生产制造中的关键设备，在企业中得到普遍的应用[7]。

（3）高档型数控机床　高档型数控系统，一般用于多轴车削中心、多轴铣削中心、自动生产线的多轴控制、柔性加工单元、计算机集成制造系统等。这类数控机床的功能齐全、柔性高、价格较贵。

高档型数控机床一般采用 64 位以上微处理器，形成多 CPU 结构。采用数字化交流伺服电动机形成闭环驱动，并使用直线伺服电动机，具有主轴伺服功能，能实现五轴以上联动，脉冲当量（分辨率）为 0.1 ~ 1μm，进给速度可达 100m/min 以上。具有友好的图形用户界面，有三维动画功能，能进行加工仿真检验。同时还具有多功能智能监控系统和面向用户的宏程序功能，还有很强的智能诊断和智能工艺数据库，能实现加工条件的自动设定，且具有制造自动化协议（Manufacturing Automation Protocol，MAP）等高性能通信接口，能实现计算机联网和通信。

1.4　数控机床的产生和发展

数控机床综合应用了自动控制、计算机、微电子、精密测量和机床结构等方面的最新成就。几十年来，随着科学技术的发展，机床数控技术亦经历了数代的变化，当前又出现了一

些新的发展动向，以下对数控机床的发展历程和发展趋势进行简单介绍。

1.4.1 数控机床的发展历程

1948 年，美国 Parson 公司接受美国空军委托，研制飞机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是提出数控机床的设想。

1949 年美国 Parson 公司与麻省理工学院开始合作研制数控机床。1952 年研制出能进行三轴控制的数控铣床样机，从此开创了数控加工时代。

由于数控机床在制造领域的特殊地位和贡献，“数控”成了机床控制系统的专用概念。

第一代数控机床产生于 1952 年，一台三坐标数控立式铣床，采用电子管元件构成的专用数控装置。我国从 1958 年起步，研制出了电子管数控机床。

第二代数控系统，是 1959 年采用了晶体管和印制电路板研制的数控系统，体积大大缩小。我国于 1964 年研制了晶体管型数控系统用于铣床上。

1965 年出现了小规模集成电路，由于体积小功耗低，使数控系统的可靠性得到了进一步的提高，这是第三代数控系统。我国于 1975 年前后研制了“加工中心”镗床铣床，采用了 J-K 触发器和 TTL 电路。

以上三代数控系统是用专用控制计算机的硬接线数控系统，称为硬线系统即 NC（Numerical Control）系统。

第四代数控系统，是从 1970 年开始采用大规模集成电路的小型通用电子计算机控制的系统（CNC）。

第五代数控系统。1974 年美国、日本等国的数控系统生产厂家，首先研制出以微处理器为核心的数控系统（MNC）。由于微处理器的集成度不断提高，运算速度越来越快，功能也越来越丰富。今后微处理器的速度还会提高，数控的功能会有更大的提高，因此除了有特殊要求的系统外，中小型计算机数控均可用微型计算机数控来代替。

20 世纪 80 年代末基于 DSP（Digital Signal Processor）的运动控制技术的突破，为开放式数控系统的发展创造了新的条件。以基于 DSP 的运动控制器为核心，融合 PLC 功能，与标准 PC 机集成的新一代开放式数控系统有可能成为第六代数控系统的主导产品。

人们习惯上将第四代、第五代和第六代数控技术统称为 CNC—软件数控[8]。

1.4.2 数控机床的发展趋势

随着计算机及电子技术的发展，数控技术也不断发展，从目前世界上数控技术及其装备发展的趋势来看，其主要研究热点有以下几个方面：

1. 智能化、高速化、高精度化

新一代数控机床为提高生产效率，向超高速方向发展，采用新型功能部件（如电主轴、直线电动机、LM 直线滚动系统等），主轴转速达 15000r/min 以上。

机床与机器人的集成应用日趋普及，且结构形式多样化，应用范围扩大化，运动速度高速化，多传感器融合技术实用化，控制功能智能化，多机器人协同普及化。

智能化加工与监测功能不断扩充，车间的加工监测与管理可实时获取机床本身的状态信息，分析相关数据，预测机床的状态，提前进行相关的维护，避免事故的发生，减少机床的故障率，提高机床的利用率。

最新的机床误差检测与补偿技术能够在较短的时间内完成对机床的补偿测量，与传统的

激光干涉仪相比，对机床误差的补偿精度能够提高 3 ~4 倍，纳米控制已经成为高速高精加工的潮流，同时效率得到大幅度提升。

2. 功能复合化

复合机床的含义是指在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的多种要素加工。

根据其结构特点可分为工艺复合型和工序复合型两类。工艺复合型机床如镗铣钻复合加工中心、车铣复合车削中心、铣镗钻车复合加工中心等；工序复合型机床如多面多轴联动加工的复合机床和双主轴车削中心等。

采用复合机床进行加工，减少了工件装卸、更换和调整刀具的辅助时间以及中间过程中产生的误差，提高了零件加工精度，缩短了产品制造周期，提高了生产效率和制造商的市场反应能力，相对于传统的工序分散的生产方式具有明显的优势。

加工过程的复合化也导致了机床向模块化、多轴化发展。其核心是在一台机床上要完成车、铣、钻、滚齿、磨削、激光热处理等多种工序，从而提高了机床的效率和加工精度，提高生产的柔性。

3. 设计、制造绿色化

绿色设计是一种综合考虑了产品设计、制造、使用和回收等整个生命周期的环境特性和资源效率的先进设计理论和方法。

数控机床在设计时要考虑：绿色材料设计，可拆卸性设计，节能性设计，可回收性设计，模块化设计，绿色包装设计等。

绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源消耗的现代制造模式，通过绿色生产过程生产出绿色产品。

数控机床在制造时要考虑：节约资源的工艺设计，节约能源的工艺设计，环保型工艺设计等。

4. 开放性体系结构

新一代数控系统的开发核心是开放性。有软件平台和硬件平台两种开放式系统，采用模块化、层次化的结构，并通过各种形式向外提供统一的应用程序接口。

目前开放式数控系统的体系结构规范、通信规范、配置规范、运行平台、数控系统功能库以及数控系统功能软件开发工具等是研究的核心。网络化数控装备是近两年的一个新的焦点。数控装备的网络化将极大地满足生产线、制造系统、制造企业对信息集成的需求，也是实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟企业、全球制造的基础单元。

目前许多国家为解决传统数控系统的封闭性和数控应用软件的产业化生产存在的问题，对开放式数控系统进行了深入研究，已成为数控系统的未来之路。国内外一些著名数控机床和数控系统制造公司都在近两年推出了相关的新概念和样机。如美国科学制造中心（NCMS）与空军共同领导的“下一代工作站/机床控制器体系结构”（NGC），欧共体的“自动化系统中开放式体系结构”（OSACA），日本的 OSEC 计划等。目前开发研究成果已得到应用，如 Cincinnati-Milacron 公司从 1995 年开始在其生产的加工中心、数控铣床、数控车床等产品中采用了开放式体系结构的 A2100 系统。

开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术，如多媒体技术，实现声控自动编程、图形扫描自动编程等。数控系统继续向高集成度方向发展，每个芯片上可以集成更多个晶体管，使系统体积更小，更加小型化、微型化，可靠性大大提高。利用多 CPU 的优势，

实现故障自动排除，增强通信功能，提高进线、联网能力。开放式体系结构的新一代数控系统，其硬件、软件和总线规范都是对外开放的，由于有充足的软、硬件资源可供利用，不仅使数控系统制造商和用户进行的系统集成得到有力的支持，而且也为用户的二次开发带来极大方便，促进了数控系统多档次、多品种的开发和广泛应用，既可通过升档或减裁构成各种档次的数控系统，又可通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统，开发生产周期大大缩短。这种数控系统可随 CPU 升级而升级，结构上不必变动。

1.4.3 我国数控机床的发展情况

我国从 1958 年开始研制数控机床。20 世纪 60 年代针对壁锥、非圆齿轮等复杂形状的工件研制出了数控壁锥铣床、数控非圆齿轮插齿机等设备，保证了加工质量，减少了废品，提高了生产效率，取得了良好的效果。20 世纪 70 年代针对航空工业等加工复杂形状零件的需要，从 1973 年开始组织了数控机床攻关，经过 3 年努力，到 1975 年已试制生产了 40 多个品种 300 多台数控机床。据国家统计局的资料，从 1973—1979 年，7 年内全国累计生产数控机床 4108 台（其中约 3/4 以上为数控线切割机床）。

到 20 世纪 80 年代，随着我国实行改革开放政策，我国从日本发那科（FANUC）公司引进了 5、7、3 等系列的数控系统和直流伺服电动机，直流主轴电动机技术，并在北京机床研究所建立了数控设备厂，1982 年生产约 40 套系统，1983 年生产约 100 套系统，1985 年生产约 400 套系统，伺服电动机与主轴电动机也配套生产。这些系统是国外 20 世纪 70 年代的水平，功能较全，可靠性比较高，这样就使我国机床行业发展数控机床有了可靠的基础，使我国的主机品种与技术水平都有较大的发展与提高。1982 年，青海第一机床厂生产的 XHK754 卧式加工中心，长城机床厂生产的 CK7815 数控车床，北京机床研究所生产的 JCS018 立式加工中心，上海机床厂生产的 H160 数控端面外圆磨床等，都能可靠地进行工作，并陆续形成了机床的批量生产。1984 年仅机械工业部门就生产数控机床 650 台，全国当年总产量为 1620 台，已有少数产品开始进入国际市场，还有几种合作生产的数控机床返销国外。1985 年，我国数控机床的品种已有了新的发展，除了各类数控线切割机床以外，其他各种金属切削机床（如各种规格的立式、卧式加工中心，立式、卧式数控车床，数控铣床，数控磨床等），也都有了极大的发展，新品种总计 45 种。到 1989 年底，我国数控机床的可供品种已超过 300 种，其中数控车床占 40%，加工中心占 27%。

到了 20 世纪 90 年代初，我国生产的数控机床已达 300 余种，一些较高档次的五轴联动数控系统也已开发出来。1984 年北京机床研究所研制成功了 FMC—1 和 FMC—2 柔性加工单元，之后又开始了柔性制造系统的开发工作，并与日本发那科公司合作，在北京机床研究所内建立了第一条柔性制造系统（JCS—FMC—1 型），用于加工直流伺服电动机的轴类、法兰盘类、刷架体类和壳体类的 14 种零件。近年来，依靠我国科技人员的努力，已先后研制成功并在北京、长春等地安装使用了柔性制造系统（FMS），并开始进行计算机集成制造系统（CIMS）的研究，同时探索其在生产中的应用。为适应“十三五”国防军工和机床行业发展的新形势新环境，2016 年以来，长效合作机制将工作和服务方向调整为：从重数控机床产品应用，转化为应用与质量跟踪评价并重；从支持主机产品推广，转为主机与数控系统并重；以需求牵引机床产品研发，转为军工个性化工艺预定制产品；从单台设备推广，转化为重视成套成线智能化整体解决方案的提供。

这一切说明，我国的机床数控技术已经进入了一个新的发展时期，预计在不远的将来，

我国将会赶上和超过世界先进国家的水平。

【知识拓展】

世界新一轮科技创新加速推进，基于互联网环境下的集成化的智能制造正在兴起，而数控机床变化主要体现在复合加工机床和虚拟设备两方面。

复合加工机床用来完成传统需要多台机床加工的复杂零部件的加工，复合加工机床实现了一次装夹、多种加工的要求。复合加工机床将车、铣、磨等多种不同类型的加工工序集中到一台机床上，只需要将工件进行一次装夹定位，然后通过数控系统控制不同的主轴和进给部件对工件进行联动加工。

复合工艺应用非常广泛，如焊铣复合、镗铣珩磨复合、车磨复合。而复合加工机床广泛采用智能技术，如与上下料系统结合，实现批量生产。通过降低多次装夹造成的基准偏差，显著提升复杂工件的加工精度，降低工艺局限性对产品设计的约束。

虚拟设备是基于大数据采集与分析技术的重要领域。随着数控机床的开放性逐步提高，现代机床可支持的基础元器件种类显著增多，同时，针对不同的数据采集需求，越来越多的传感器内嵌到数控机床中。机床数据采集种类不仅包括机床内部信息，如光栅尺位置、指令信息、主轴电流、力矩电流、G 指令时间、刀具信息等，也包括外部传感器的信息，如主轴径向变形、床身振动、机床热误差等。这些数据不仅能够支持一般的制造过程管理，而且足以支持基于大数据分析的制造过程优化。

从技术发展途径的角度来看，实现基于大数据分析的加工过程优化分为以下 3 个步骤：首先，实现机床大数据的可视化。显性的、量化的制造过程数据是分析与决策的依据，目前大多数控系统均提供了数据采集接口，能够方便地从中提取相关参数信息。其次，实现基于可视化数据的辅助智能。当制造数据被提取出来之后，建立这些数据与加工过程、加工指令之间的映射关系，并通过人工分析对影响加工效率或加工质量的程序片段予以优化。最后，实现基于大数据的人工智能。建立制造数据与质量、效率之间的关联知识库，通过对机床运行参数的实时分析来预判产品质量、机床故障等，并进行实时优化调整，进而真正达到自适应加工的水平。

以虚拟设备得出数据为基础，可以在实际加工之前对工艺流程和加工方法进行优化，大幅度提高加工效率并且显著降低加工成本。

【本章小结】

本章引入了数控机床的一些基本概念，介绍了数控系统的产生、发展、组成和分类，对数控系统和数控机床进行了全面的介绍。

通过本章的学习，应当明确以下几点：

1）数控机床的核心问题是如何用数字代码的方式记载、输入并控制机床工作台移动的距离、方向、轨迹和速度。数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统、机床和测量反馈装置等组成。在 CNC 和 MNC 系统中，其数控装置的功能由一台计算机（或微型计算机）来实现。

2）数控机床可以按多种方式进行分类。若按工艺用途，可将其分为一般数控机床、数控加工中心、多坐标机床等；若按加工路线分类，则可以分为点位控制、点位直线控制和轮

廓控制的数控机床；若按测量装置的有无及位置可分为开环、闭环和半闭环系统；还可以按数控装置，将其分为普通数控（NC）机床、计算机数控（CNC）机床和微处理机数控（MNC）机床等。

思考题与习题

1-1　数控机床由哪几部分组成？各组成部分的主要作用是什么？

1-2　何谓点位控制、点位直线控制、轮廓控制？三者有何区别？

1-3　数控机床有何优缺点？选择时应主要考虑哪些因素？它适应于哪种组织形式的生产？

1-4　什么叫脉冲当量？数控机床常用的脉冲当量是多少？它影响着数控机床的什么性能？

1-5　什么是开环、闭环、半闭环伺服系统数控机床？它们之间有什么区别？

1-6　数控技术在先进制造技术中的作用是什么？

第 2 章　数控编程中的数值计算

【知识要点】

1. 了解数控编程前数值计算的主要内容和基本的方法。
2. 掌握利用三角函数计算基点坐标的方法。
3. 了解非圆曲线节点坐标的计算方法。
4. 掌握辅助坐标点的计算方法。

数控机床的控制系统主要进行的是位置控制，即控制刀具的切削位置。数控编程的主要工作就是把加工过程中刀具移动的位置按一定的顺序和方式编写成程序单，输入机床的控制系统来操纵加工过程。刀具移动位置是根据零件图样，按照已经确定的加工路线和允许的加工误差（即容差：插补线段逼近实际轮廓曲线时允许存在的误差）计算出来的。这一工作称为数控加工编程中的数值计算。数值计算主要用于手工编程时的轮廓加工。

数控加工编程中的数值计算主要包括：零件轮廓中几何元素的基点、插补线段的节点、刀具中心位置及一些辅助计算等内容。

1. 基点（Base Point）

基点就是构成零件轮廓的各相邻几何元素之间的交点或切点。如两直线的交点、直线与圆弧的交点或切点、圆弧与二次曲线的交点或切点等，均属基点。一般来说，基点的坐标根据图样给定的尺寸，利用一般的解析几何或三角函数关系不难求得。

2. 节点（Node Point）

节点是在满足容差要求条件下用若干插补线段（如直线段或圆弧段等）去逼近实际轮廓曲线时，相邻两插补线段的交点。节点的计算比较复杂，方法也很多，是手工编程的难点。有条件时，应尽可能借助于计算机来完成，以减少计算误差并减轻编程人员的工作量。

一般称基点和节点为切削点，即刀具切削部位必须切到的点。

3. 刀具中心位置（Tool Center Position）

刀具中心位置是刀具相对于每个切削点刀具中心所处的位置。因为刀具都有一定的半径，要使刀具的切削部位切过轮廓的基点和节点，必须对刀具进行一定的偏置。对于没有刀具偏置功能的数控系统，应计算出相对于基点和节点的刀具中心位置轨迹。对于具有刀具偏置功能的数控系统，加工某些内腔型面时，往往也要求计算出刀具中心轨迹的坐标数据。

4. 辅助计算（Auxiliary Calculation）

辅助计算包括以下内容：

（1）增量计算　对于增量坐标的数控系统，应计算出后一节点相对前一节点的增量值。

（2）脉冲数计算　数值计算是以毫米为单位进行的，而数控系统若要求输入脉冲数，则应将计算数值换算为脉冲数。

（3）辅助程序段的数值计算　对刀点到切入点的程序段，以及切削完毕后返回到对刀

点的程序均属辅助程序段。在填写程序单之前，辅助程序段的数据也应预先确定。

2.1 平面轮廓切削点的计算

2.1.1 基点的计算

一零件轮廓如图 2-1 所示，其中 A、B、C、D、E、F 为基点，A、B、C、D 可直接由图中所设工件坐标系得知，而 E 点是直线 DE 与 EF 的交点，F 是直线 EF 与圆弧 AF 的切点。分析可知，OF 与 X 轴的夹角为 30°，EF 与 X 轴夹角为 120°，则

$$F_x = 20\text{mm} \times \cos 30° = 17.321\text{mm}，\ F_y = 20\text{mm} \times \sin 30° = 10\text{mm}$$

$$E_y = 30\text{mm}，\ E_x = F_x - (E_y - F_y)/\tan 60° = 5.774\text{mm}$$

2.1.2 节点的计算

大多数铣床或加工中心都具有直线及圆弧插补功能，因此在加工由直线、圆弧组成的平面轮廓时，只需进行各基点的数值计算，不涉及节点计算问题。但若零件轮廓不是由直线和圆弧组合而成，则要用直线段或圆弧段去逼近轮廓曲线，故要进行相应的节点计算。

节点计算的方法很多，一般可根据轮廓曲线的特性、数控系统的插补功能及加工要求的精度而定。若轮廓曲线的曲率变化不大，可采用等步长法计算插补节点；若轮廓曲线的曲率变化较大，可采用等误差法计算插补节点；若加工精度要求比较高，可采用逼近程度较高的圆弧插补法计算插补节点。而节点的数目主要取决于轮廓曲线的特性方程、插补线段的形状及容差要求。若用直线插补去逼近轮廓曲线，一般有 3 种方法，即切线逼近法、割线逼近法和弦线逼近法。从计算简单的角度来说，用弦线法比较好。下面介绍几种常用插补方法中节点坐标的计算。

1. 直线插补圆弧的节点计算

在只有直线插补功能的数控系统中，加工圆弧要靠直线插补来实现。直线插补圆弧是用直线作弦或切线去逼近圆弧。如图 2-2 所示，一圆弧$\overset{\frown}{AB}$的半径为 R，起始角为 α，终止角为 β，圆心位于（x_0，y_0），若插补容差为 δ，则插补节点的计算步骤如下：

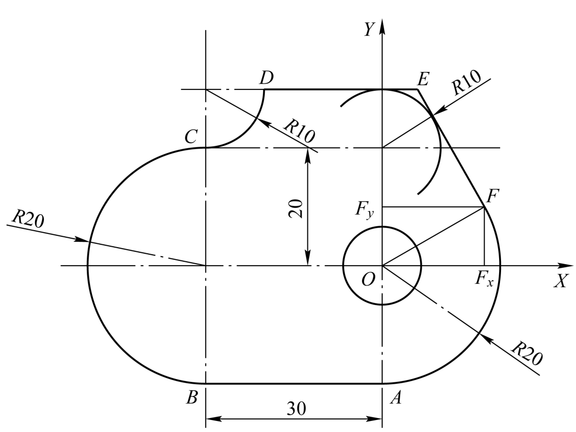


图 2-1　轮廓基点计算

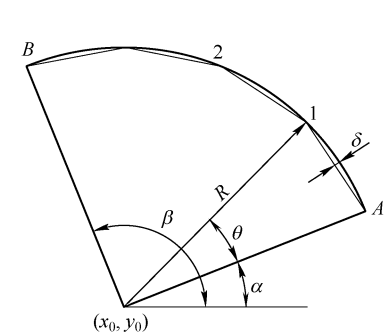


图 2-2　圆弧直线插补节点计算

1）求插补线段所对应的圆心角 θ

$$\theta=2\arccos[(R-\delta)/R]$$

2）求插补节点数 n

$$n\leqslant|\beta-\alpha|/\theta$$

n 取 $|\beta-\alpha|/\theta$ 舍去小数部分的整数值。

3）求插补节点坐标

$$x_i=x_0+R\cos(\alpha\pm i\theta)$$
$$y_i=y_0+R\sin(\alpha\pm i\theta)$$

式中，$i=1, 2, \cdots, n$，沿逆时针方向插补圆弧时取"+"号，沿顺时针方向插补圆弧时取"−"号。

2. 等步长法插补节点的计算

等步长法是指插补的直线段长度相等，而插补误差则不一定相同。计算插补节点时，必须使产生的最大插补误差 δ_{max} 小于或等于允许的插补误差 δ，以满足加工精度的要求。图 2-3 所示为一段轮廓曲线。设曲线方程为 $y=f(x)$，则等步长插补节点的计算步骤为

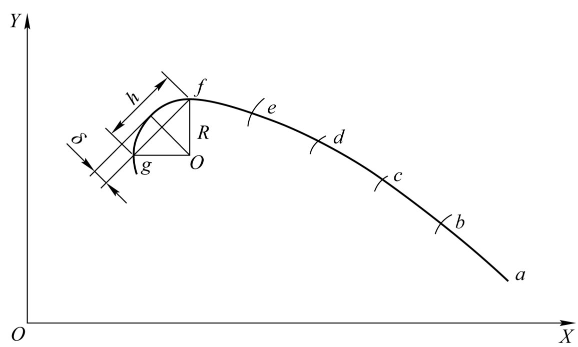


图 2-3　等步长法插补节点计算

1）求曲线段的最小曲率半径 R_{min}。最大插补误差 δ_{max} 必在最小曲率半径 R_{min} 处产生。已知曲线曲率半径为

$$R=[1+(y')^2]^{3/2}/|y''| \tag{2-1}$$

求最小曲率半径，应将式（2-1）对 x 求一阶导数，即

$$\mathrm{d}R/\mathrm{d}x=\{3(y'')^2y'[1+(y')^2]^{1/2}-[1+(y')^2]^{3/2}y'''\}/(y'')^2$$

令　　$\mathrm{d}R/\mathrm{d}x=0$，得　$3(y'')^2y'-[1+(y')^2]y'''=0$　　（2-2）

由此可求出最小曲率半径处的 x 值。将此值代入式（2-1），可得 R_{min}。

2）求插补步长 h。在三角形 Δofg 中，有

$$(h/2)^2=R^2-(R-\delta_{max})^2$$

取 $\delta_{max}=\delta$（一般取零件公差的 1/5～1/10），$R=R_{min}$，则插补步长 h 为

$$h\approx\sqrt{8R_{min}\delta} \tag{2-3}$$

3）求插补节点。步长 h 确定之后，以曲线的起点 a（x_0，y_0）为圆心，步长 h 为半径作圆，该圆与曲线的交点 b，即为第一个插补节点，联立方程

$$\begin{cases} y=f(x) \\ (x-x_0)^2+(y-y_0)^2=8R_{\min}\delta \end{cases} \tag{2-4}$$

解（x_1，y_1）即为 b 的坐标。再以 b 点为圆心，重复求插补节点步骤，既可求得下一插补节点。依次类推，可求得 $y=f(x)$ 的全部插补节点。

【例 2.1】 一轮廓曲线方程为 $x^2=4ay$，起点为（0，0）。求其全部插补节点。

解： 由题得

$$y'=x/2a$$
$$y''=1/2a$$
$$y'''=0$$

代入式（2-2）得

$$3(y'')^2y'-[1+(y')^2]y'''=0$$

再将所得的结果 $x=0$ 代入式（2-1）得

$$R=[1+(y')^2]^{3/2}/|y''|$$

可得

$$R_{\min}=2a$$

将 $R_{\min}$ 代入式（2-3），得

$$h\approx\sqrt{16a\delta}$$

最后由式（2-4）解联立方程

$$\begin{cases} x^2=4ay \\ x^2+y^2=16a\delta \end{cases}$$

即可得第一个插补节点，重复求插补节点步骤，可求得其余插补节点。

等步长插补法，计算过程比较简单，但因步长取决于最小曲率半径，致使曲率半径较大处的节点过多过密，所以等步长法只适用于曲率半径变化不是太大的曲线。

3. 等误差法插补节点的计算

等误差法可使各插补直线段的插补误差小于或等于允许的插补误差，其插补线段可长可短。该插补法适用于轮廓曲率变化比较大、形状比较复杂的工件，是插补线段最少的方法。如图 2-4 所示，设轮廓曲线方程为 $y=f(x)$，插补容差为 δ，则等误差法插补节点的计算步骤为

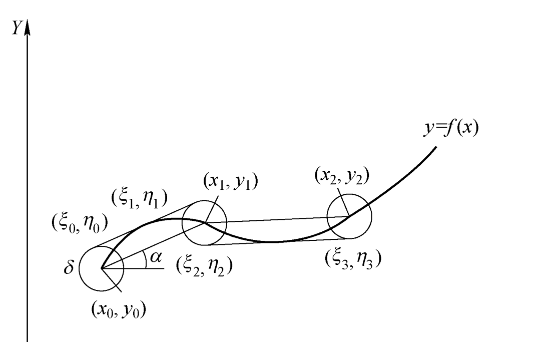


图 2-4　等误差法插补节点计算

1）以曲线起点（x_0，y_0）为圆心，δ 为半径作圆，圆方程为

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=\delta^2$$

2）作该圆与轮廓曲线 $y=f(x)$ 的公切线，得到两切点（ξ_0，η_0）、（ξ_1，η_1），满足下列联立方程

对曲线

$$\begin{cases} f'(\xi_1)=(\eta_1-\eta_0)/(\xi_1-\xi_0) \\ f(\xi_1)=\eta_1 \end{cases}$$

对圆

$$\begin{cases} F'(\xi_0)=(\eta_1-\eta_0)/(\xi_1-\xi_0) \\ F(\xi_0)=\eta_0 \end{cases}$$

式中，$y=F(x)$ 表示圆方程。由此可求得公切线斜率 k，即

$$k=(\eta_1-\eta_0)/(\xi_1-\xi_0)$$

3）过（x_0，y_0）点作公切线的平行线。

$$y-y_0=k(x-x_0)$$

4）将平行线方程与轮廓曲线方程联立，可求得第一个节点坐标（x_1，y_1），即

$$\begin{cases} y=f(x) \\ y-y_0=k(x-x_0) \end{cases}$$

依此类推，再以（x_1，y_1）点为圆心重复上述步骤，可求其余插补节点。

4. 圆弧插补曲线节点的计算

用圆弧段逼近轮廓曲线是一种精度较高的插补方法。用这种方法插补轮廓曲线时，需计算出各插补圆弧段半径、圆心及圆弧段的起点和终点（即轮廓曲线上的插补节点）。如图 2-5所示，设轮廓曲线方程为 $y=f(x)$，插补容差为 δ，圆弧插补节点的计算步骤如下

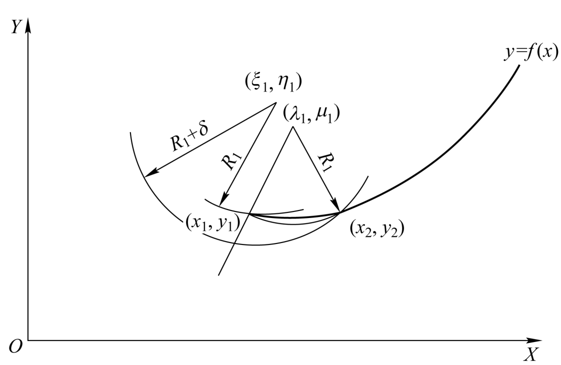


图 2-5　圆弧插补曲线节点的计算

1）求曲线起点（x_1，y_1）处的曲率半径 R_1，得

$$R_1=[1+(y')^2]^{3/2}/|y''|$$

2）求（x_1，y_1）处的曲率圆的圆心坐标（ξ_1，η_1）得

$$\xi_1=x_1-y'[1+(y')^2]/y''$$

$$\eta_1=y_1+[1+(y')^2]/y''$$

3）以（ξ_1，η_1）为圆心，$R\pm\delta$ 为半径的圆弧与曲线 $y=f(x)$ 交于点（x_2，y_2），即插

补节点。解联立方程

$$\begin{cases} y=f(x) \\ (x-\xi_1)^2+(y-\eta_1)^2=(R_1\pm\delta)^2 \end{cases}$$

式中，当轮廓曲线的曲率递减时，取 $R_1+\delta$ 为半径；当轮廓曲线的曲率递增时，取$R_1-\delta$为半径。解上述联立方程得到（x，y），即为圆弧与曲线的交点（x_2，y_2）。曲线 $y=f(x)$ 在（x_1，y_1）和（x_2，y_2）两节点间的线段是以此为起点、终点的圆弧替代的。

4）求插补圆弧的圆心（λ_1，μ_1）。插补圆弧的圆心是这样求得的：分别以（x_1，y_1）和（x_2，y_2）为圆心，以 R_1为半径作两段相交的圆弧，两圆弧的交点即为所求的圆心。故须解下列联立方程

$$\begin{cases} (x_1-\lambda_1)^2+(y_1-\mu_1)^2=R_1^2 \\ (x_2-\lambda_1)^2+(y_2-\mu_1)^2=R_1^2 \end{cases}$$

求得的（λ_1，μ_1）即为插补圆弧段的圆心。

重复上述过程，从（x_2，y_2）处开始，可求得曲线 $y=f(x)$ 在（x_2，y_2）处的曲率半径 R_2和曲率圆圆心（ξ_2，η_2）及插补圆弧段的圆心（λ_2，μ_2）。依此类推，可完成全部插补节点、插补圆弧半径及插补圆弧圆心的计算。

2.2　平面轮廓刀具中心位置的计算

机床数控系统在控制刀具进行切削加工时，是按刀具中心（立铣刀是指刀具端面的中心位置）在工件坐标系中的位置进行控制的。显然刀具中心不能落在切削点上，因为刀具都有一定的尺寸，要使刀具的切削表面始终相切地经过工件轮廓的切削点，必须对刀具进行一定的偏置。刀具偏置又称刀具半径补偿或刀具半径偏移。

具有刀具中心自动偏移功能的数控机床，可直接按零件轮廓切削点的位置进行编程，其刀具半径偏移由数控系统自动调用预先存储在刀具半径补偿地址中的数值来实现。但对于没有刀具自动偏移功能的数控系统，则需要计算出相对于切削点的刀具中心位置的坐标作为编程数据。在平面轮廓加工中，常用立铣刀，设刀具半径为 R，若切削点的坐标为（x，y），切削点的单位法矢为 $\boldsymbol{n}(\boldsymbol{n}_x，\boldsymbol{n}_y)$，则相应于切削点的刀具中心位置为

$$\begin{cases} x_{刀}=x+R\boldsymbol{n}_x \\ y_{刀}=y+R\boldsymbol{n}_y \end{cases}$$

由此可见，刀具一经选定，只要求出各刀具切削点的单位法矢，就可算出刀具中心的偏置位置，从而求得刀具中心轨迹。

2.2.1　直线段的单位法矢

设 ab 为平面轮廓上一直线段，起点为 $a(x_a，y_a)$，终点为 $b(x_b，y_b)$，该定向直线段的单位矢量为：

$$\boldsymbol{\tau}=\{\tau_x，\tau_y\}=\left\{\frac{x_b-x_a}{L}，\frac{y_b-y_a}{L}\right\}$$

式中，$L=\sqrt{(x_b-x_a)^2+(y_b-y_a)^2}$为直线段的长度。显然，直线上任一点处的单位矢量都是相同的。所以，直线 ab 上各点的单位法矢 n 也都是相同的。即

$$n=\{n_x,n_y\}=\{\mp\tau_y,\pm\tau_x\}$$

式中，正负号的选取规定如下：沿着刀具前进方向，当刀具始终位于直线 ab 的左侧时（即左偏置）取上面的符号；当刀具始终位于直线 ab 的右侧时（即右偏置）取下面的符号。

2.2.2　圆弧段上某切削点的单位法矢

设 P 是半径为 R，圆心为 C 的圆弧上任一切削点，圆弧在 P 点处的单位法矢即为圆心 C 到 P 有向连线的单位矢量。即

$$\boldsymbol{n} = \{\boldsymbol{n}_x, \boldsymbol{n}_y\} = \left\{ \mp \frac{x_p - x_c}{R}, \pm \frac{y_p - y_c}{R} \right\}$$

当刀具外偏置（刀具始终在圆弧的凸侧）时，两分量均取上面的符号；当刀具内偏置（刀具始终在圆弧凹侧）时，两分量均取下面的符号。

2.2.3　平面曲线上某切削点的单位法矢

设 P 为曲线 $f(x)$ 上的任一切削点，则曲线在该点的斜率为

$$\tan\alpha = f'(x_p)$$

其单位切矢为

$$\boldsymbol{\tau} = \{\boldsymbol{\tau}_x, \boldsymbol{\tau}_y\} = \{\cos\alpha, \sin\alpha\}$$

相应的单位法矢为

$$\boldsymbol{n} = \{\boldsymbol{n}_x, \boldsymbol{n}_y\} = \{\mp \boldsymbol{\tau}_y, \pm \boldsymbol{\tau}_x\}$$

式中，正负号选取规则为：顺着刀具前进方向，刀具左偏置时，取上方符号；刀具右偏置时，取下方符号。

2.2.4　尖角过渡的数值计算

除了上述光滑、连续的刀具偏置情况外，加工部件的轮廓一般还常常存在一些非光滑的拐角，刀具在这些拐角处也必须进行合适的过渡（即刀具合适的偏置）。

常用的过渡方法有两类：圆弧过渡和尖角过渡。

圆弧过渡是指在加工外轮廓时，刀具在拐点处的轨迹是以拐点为圆心，以刀具半径为半径，刀具中心沿圆弧过渡到拐角另一边的偏置位置上，如图 2-6a 所示。

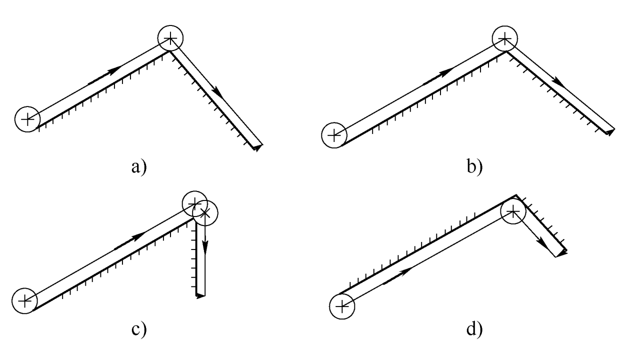


图 2-6　尖角过渡方法

尖角过渡又分外拐角过渡和内拐角过渡。对于外拐角过渡，若拐角为钝角，刀具中心在加工到首边的终点时不停止，并沿原前进方向继续行至次边加工路线的反向延长线上，然后改变方向，再沿次边加工路线前进，如图 2-6b 所示；若拐角为锐角，如用图 2-6b 所示方法，则刀具空程路线过长，影响切削效率，常采用截距法改善这种情况。即在加工首边时，

刀具在首边终点处沿原前进方向再走一个刀具半径的距离，然后折向次边加工路线距次边终点偏置位置一个刀具半径距离处，最后再沿着次边加工路线加工次边，如图 2-6c 所示。对于内拐角过渡，刀具在拐角两边刀具偏置路线的交点处改变方向，如图 2-6d 所示。由此可以看出，在加工内拐角时，总有一个刀具加工不到的盲区。因此，在加工有内拐角工件时，应选择合适的刀具，尽量减小加工盲区。

尖角过渡处刀具拐点的数值计算比较繁琐，目前广泛使用的数控机床一般都具有刀具拐角过渡的自动补偿功能，免除了编程人员大量的计算任务。

【知识拓展】

数控编程中的数学知识在手工编程中尤为重要，直接影响零件的加工形状和配合误差。数值计算牵涉到学生的数学知识，在数控加工中，零件图基本都是基于 CAD/CAM 类软件绘制的，这时我们应多使用 CAD/CAM 的坐标查询功能，可以很容易得到零件的坐标，尤其是对于形状结构比较复杂的零件，使用坐标查询法实用性更强，提高编程的效率，还可以提高坐标的计算精度，但需要操作者熟悉此类软件，而且车间购置设备时需要考虑成本的问题。

就如何在数学描述和数控加工两者之间达成对轮廓逼近的一致性，可以以 C 语言为算法核心、以 VB 为平台，开发用于平面轮廓曲线数值计算的数控编程预处理系统，可极大的简化中低档数控机床上数控加工程序编写前的数值计算过程，提高数控编程效率。

【本章小结】

本章对数控编程中平面轮廓切削点，平面轮廓刀具中心位置的计算方法和数学关系分别做了阐述，特别是基点计算。能熟练的运用各种数学方法解决问题，将能有效地缩短编程时间和避免出现较大的损失。

通过本章的学习，应当明确以下几点：

1）数值计算工作量的大小随被加工零件的形状、加工内容、数控系统的功能有所不同。

2）数值计算主要内容为：①基点和节点的计算；②刀位点轨迹的计算；③辅助计算。

这三种计算都可以利用初等数学的方法（比如三角函数、联立方程等）求解。这种方法具有实用性强的特点，但是因为是人工计算，所以容易出错且效率不高。如果利用计算机上的相关绘图软件，将图样直接绘制出来，即可得到相关数值。此方法比较前者，精度更高，处理复杂图形的能力更强。节点的计算和刀位点轨迹的计算是根据精度的要求计算出直线段或圆弧段端点坐标值。节点坐标数据的计算是最繁琐、最复杂的计算，常采用曲线逼近和曲线拟合的方法，如采用人工计算，编程工作量十分巨大，因此这种数值计算一般需要用计算机来完成。

思考题与习题

2-1　数控编程的数值计算包括哪些内容？

2-2　什么是基点与节点？基点和节点有什么区别？

2-3　等步长法插补轮廓曲线，其插补节点的计算步骤是什么？试述其特点和适用范围。

2-4　等误差法插补轮廓曲线，其插补节点的计算步骤是什么？试述其特点和适用范围。

2-5　试述弦线插补圆弧段时插补节点的计算方法。

2-6　试述圆弧插补轮廓曲线时插补圆弧的计算方法。

2-7　为什么要计算刀具中心位置？

2-8　刀具在尖角过渡时应考虑什么问题？

2-9　平面轮廓加工时，立铣刀的偏置规则是什么？

2-10　试在图 2-7 所示的工件坐标系中，给出零件轮廓各基点的坐标。

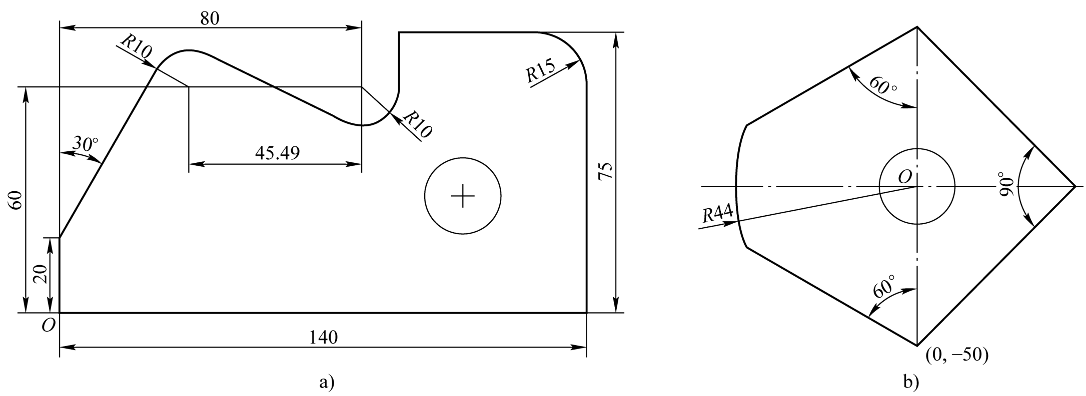


图 2-7　习题 2-10

2-11　一半径 $R = 20$mm，圆心位于坐标原点的圆弧，起点坐标为（−10，17.32），终点坐标为（12.856，15.32），若用弦线插补该圆弧，当容差分别为 0.1mm、0.01mm、0.001mm 时，各需要计算多少插补节点？

第 3 章　计算机数控系统

【知识要点】

1. CNC 系统的组成和工作内容。
2. CNC 系统的软硬件结构和分类。
3. 插补的概念及分类。
4. 脉冲增量和数据采样插补的原理。重点介绍逐点比较法和数字积分法。

3.1　概　　述

3.1.1　CNC 系统的组成

CNC 系统主要由硬件和软件两大部分组成，其核心是 CNC 装置。它通过系统控制软件配合系统硬件，合理地组织管理数控系统的信息输入、数据处理、插补和输出信息，控制执行部件，使数控机床按照操作者的要求进行自动加工。CNC 系统采用了计算机作为控制部件，通常由常驻在其内部的数控系统软件实现部分或全部数控功能，从而对机床运动进行实时控制。只要改变 CNC 系统的控制软件就能实现一种全新的控制方式。

各种数控机床的 CNC 系统一般由以下几个部分组成：中央处理单元（CPU）、只读存储器（ROM）、随机存储器（RAM）、输入/输出设备（I/O）、操作面板、PLC、显示器和键盘等。CNC 系统的一般结构框图如图 3-1 所示。

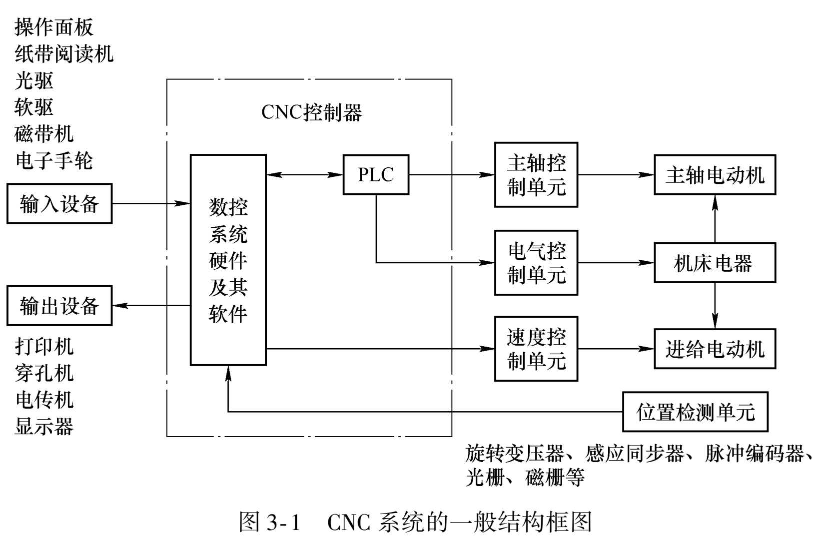


图 3-1　CNC 系统的一般结构框图

在图 3-1 所示的整个 CNC 系统的结构框图中，数控系统主要是指 CNC 控制器。CNC 控制器由数控系统硬件、软件构成的专用计算机与 PLC 组成。前者主要处理机床轨迹运动的

数字控制，后者主要处理开关量的逻辑控制。

3.1.2　CNC 系统的功能和一般工作过程

1. CNC 系统的功能

由于现在 CNC 系统普遍采用微处理器，因此通过软件可以实现很多功能。数控系统有多种系列，功能各异。数控系统的功能通常包括基本功能和选择功能。基本功能是数控系统必备的功能，选择功能是供用户根据机床特点和用途进行选择的功能。CNC 系统的功能主要反映在 G 功能（G 指令代码）和 M 功能（M 指令代码）上。根据数控机床的类型、用途、档次的不同，CNC 系统的功能有很大差别，下面介绍其主要功能。

（1）控制功能（Control Function）　CNC 系统能控制的轴数和能同时控制（联动）的轴数是其主要性能之一。控制轴有移动轴和回转轴。通过轴的联动可以完成轮廓轨迹的加工。一般情况下，数控车床只需两轴控制，两轴联动；数控铣床需要三轴控制、三轴联动或两轴半联动；而加工中心一般为多轴控制，三轴联动。控制轴数越多，特别是同时控制的轴数越多，要求 CNC 系统的功能就越强，同时 CNC 系统就越复杂，编制程序也越困难。

（2）G 功能（G Function）　G 功能也称 G 指令代码，它用来指定机床的运动方式，包括基本移动、平面选择、坐标设定、刀具补偿、固定循环等指令。对于点位式的数控机床，如数控钻床、数控冲床等，需要点位移动控制系统。对于轮廓控制的数控机床，如数控车床、数控铣床、加工中心等，需要控制系统有两个或两个以上的进给坐标具有联动功能。

（3）插补功能（Interpolation Function）　CNC 系统是通过软件插补来实现刀具运动轨迹控制的。由于轮廓控制的实时性很强，软件插补的计算速度难以满足数控机床对进给速度和分辨率的要求，同时由于 CNC 不断扩展其他方面的功能也要求减少插补计算所占用的 CPU 时间。因此，CNC 的插补功能实际上被分为粗插补和精插补，插补软件每次插补一个轮廓步长的数据为粗插补，伺服系统根据粗插补的结果，将轮廓步长分成单个脉冲的输出称为精插补。有的数控机床采用硬件进行精插补。

（4）进给功能（Feed Function）　根据加工工艺要求，CNC 系统的进给功能用 F 指令代码直接指定数控机床加工的进给速度。

1）切削进给速度。指刀具每分进给的距离（mm），如 100mm/min。对于回转轴，以每分钟进给的角度表示刀具的进给速度。

2）同步进给速度。指刀具主轴每转进给的距离（mm），如 0.02mm/r。只有主轴上装有位置编码器的数控机床才能指定同步进给速度，用于切削螺纹的编程。

3）进给倍率。操作面板上设置了进给倍率开关，倍率可以在 0%～200% 之间变化，每档间隔 10%。使用倍率开关不用修改程序就可以改变进给速度，并可以在加工工件时随时改变进给速度或在发生意外时随时停止进给。

（5）主轴功能（Spindle　Function）　主轴功能就是指定主轴转速的功能。

1）转速的编码方式。转速用 S 指令代码指定，同时在地址符 S 后加两位或四位数字表示，单位分别为 r/min 和 mm/min。

2）指定恒线速。该功能可以保证数控车床和数控磨床加工工件端面的质量和在加工不同直径外圆时具有相同的切削速度。

3）主轴定向准停。该功能使主轴在径向的某一位置准确停止，有自动换刀功能的机床必须选取有这一功能的 CNC 装置。

（6）M 功能（M Function） M 功能用来指定主轴的起、停和转向；切削液的开和关；刀库的起和停等，属开关量的控制。它用 M 指令代码表示。现代数控机床一般用 PLC 控制。各种型号的数控装置具有的 M 功能差别很大，而且有许多是自定义的。

（7）刀具功能（Tool Function） 刀具功能用来选择所需的刀具。刀具功能字以地址符 T 为首，后面跟两位或四位数字，代表刀具的编号。

（8）补偿功能（Compensation Function） 补偿功能通过输入到 CNC 系统存储器的补偿量，根据编程轨迹重新计算刀具的运动轨迹和坐标尺寸，从而加工出符合要求的工件。补偿功能主要有以下几种：

1）刀具的尺寸补偿。如刀具长度补偿、刀具半径补偿和刀尖圆弧半径补偿。这些功能可以补偿刀具磨损量，以便换刀时对准正确位置，简化编程。

2）丝杠的螺距误差补偿、反向间隙补偿和热变形补偿。通过事先检测出丝杠螺距误差和反向间隙，并输入到 CNC 系统中，在实际加工中进行补偿，从而提高数控机床的加工精度。

（9）字符、图形显示功能（Characters and Graphics Display Function） CNC 控制器可以配置数码管（LED）显示器、单色或彩色阴极射线管（CRT）显示器或液晶（LCD）显示器，通过软件和硬件接口实现字符和图形的显示。通常可以显示程序、参数、各种补偿量、坐标位置、故障信息、人机对话编程菜单、零件图形及刀具实际运动轨迹的坐标等。

（10）自诊断功能（Self-diagnosis Function） 为了防止故障的发生或在发生故障后可以迅速查明故障的类型和部位，以减少停机时间，CNC 系统中设置了各种诊断程序。不同的 CNC 系统设置的诊断程序是不同的，诊断的水平也不同。诊断程序一般可以包含在系统程序中，在系统运行过程中进行检查和诊断；也可以作为服务性程序，在系统运行前或故障停机后进行诊断，查找故障的部位。有的 CNC 系统可以进行远程通信诊断。

（11）通信功能（Communication Function） 为了适应柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统（CIMS）的需求，CNC 装置通常具有 RS232C 通信接口，有的还备有 DNC 接口。也有的 CNC 还可以通过制造自动化协议（MAP）接入工厂的通信网络。

（12）人机交互图形编程功能（Graphics Programming with Human-Computer Interaction Function） 为了进一步提高数控机床的编程效率，对于数控程序的编制，特别是较为复杂零件的数控程序都要通过计算机辅助编程，尤其是利用图形进行自动编程，以提高编程效率。因此，对于现代 CNC 系统一般要求具有人机交互图形编程功能。有这种功能的 CNC 系统可以根据零件图直接编制程序，即编程人员只需输入图样上简单表示的几何尺寸就能自动地计算出全部交点、切点和圆心坐标，生成加工程序。有的 CNC 系统可根据引导图和显示说明进行对话式编程，并具有自动工序选择、刀具和切削条件的自动选择等智能功能。有的 CNC 系统还具有用户宏程序功能（如日本 FANUC 系统）。这些功能有助于那些未受过 CNC 编程专门训练的人快速地进行程序编制工作。

2. CNC 系统的一般工作过程

（1）输入 输入 CNC 控制器的通常有零件加工程序、机床参数和刀具补偿参数。机床参数一般在机床出厂时或在用户安装调试时已经设定好，所以输入 CNC 系统的主要是零件加工程序和刀具补偿参数。输入方式有纸带输入、键盘输入、磁盘输入、上级计算机 DNC 通信输入等。CNC 系统有存储和数控两种方式处理输入。存储方式是将整个零件程序一次

全部输入到 CNC 系统内部存储器中，加工时再从存储器中把一个一个程序调出，该方式应用较多。数控方式是一边输入一边加工的方式，即在前一程序段加工时，输入后一个程序段的内容。

（2）译码　译码以零件程序的一个程序段为单位进行处理，把其中零件的轮廓信息（起点、终点、直线或圆弧等），F、S、T、M 等按一定的语法规则解释（编译）成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用区域。编译过程中还要进行语法检查，发现错误立即报警。

（3）刀具补偿　刀具补偿包括刀具半径补偿和刀具长度补偿。为了方便编程人员编制零件加工程序，编程时零件程序是以零件轮廓轨迹来编程的，与刀具尺寸无关。程序输入和刀具参数输入分别进行。

刀具补偿包括 B 功能和 C 功能刀具补偿。在较高档次的 CNC 系统中一般应用 C 功能刀具补偿，C 功能刀具补偿能够实现程序段之间的自动转接和过切削判断等功能。

（4）进给速度处理　数控加工程序给定的刀具相对于工件的移动速度，是在各个坐标合成运动方向上的速度，即 F 代码的指令值。速度处理首先要进行的工作是将各坐标合成运动方向上的速度分解成各进给运动坐标方向的分速度，为插补时计算各进给坐标的行程量做准备；另外对于机床允许的最低和最高速度也在这里处理。有的 CNC 系统软件的自动加速和减速也放在这里。

（5）插补　零件加工程序段中的指令行程信息是有限的。如对于加工直线的程序段仅给定起点、终点坐标；对于加工圆弧的程序段除了给定其起点、终点坐标外，还给定其圆心坐标或圆弧半径。要进行轨迹加工，CNC 系统必须从一条已知起点和终点的曲线上自动进行“数据点密化”的工作，这就是插补。插补在每个规定的周期（插补周期）内进行一次，即在每个周期内，按指令进给速度计算出一个微小的直线数据段，通常经过若干个插补周期后，插补完一个程序段的加工，也就完成了从程序段起点到终点的“数据点密化”工作。

（6）位置控制　位置控制装置位于伺服系统的位置环上，如图 3-2 所示。它的主要工作是在每个采样周期内，将插补计算出的理论位置值与实际反馈位置值进行比较，用其差值控制进给电动机移动。位置控制可由软件完成，也可由硬件完成。在位置控制中通常还要完成位置回路的增益调整、坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿等，以提高机床的定位精度。

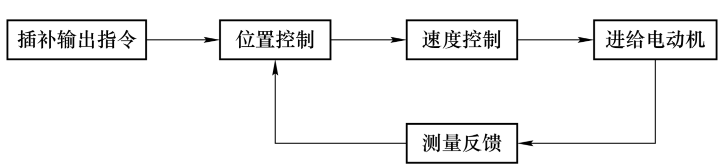


图 3-2　位置控制的原理

（7）I/O 处理　CNC 系统的 I/O 处理是 CNC 系统与机床之间的信息传递和变换的通道。其作用一方面是将机床运动过程中的有关参数输入到 CNC 系统中；另一方面是将 CNC 系统的输出命令（如换刀、主轴变速换挡、加切削液等）变为执行机构的控制信号，实现对机床的控制。

（8）显示　CNC 系统的显示主要是为操作者提供方便。显示装置有 LED 显示器、CRT

显示器和 LCD 显示器，一般位于机床的控制面板上。通常有零件程序的显示、参数的显示、刀具位置显示、机床状态显示、报警信息显示等。有的 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静态和动态模拟加工图形显示。

上述 CNC 系统的工作流程如图 3-3 所示。

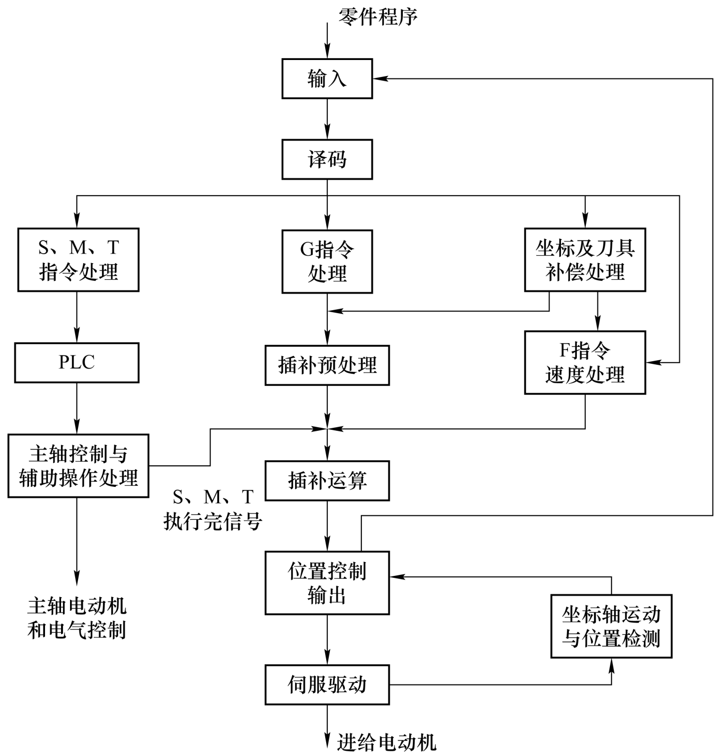


图 3-3　CNC 系统的工作流程

3.2　CNC 系统的硬件结构

CNC 装置硬件结构一般分为单 CPU 和多 CPU 结构两大类。经济型数控装置一般采用单 CPU 结构，中高档 CNC 装置常采用多 CPU 结构。采用多 CPU 结构，能使数控机床向高速度、高精度和高智能化方向发展。

3.2.1　单 CPU 结构 CNC 系统

单 CPU 结构 CNC 系统的基本结构包括 CPU、总线、I/O 接口、存储器、串行接口和 CRT/MDI 接口等，还包括数控系统控制单元部件和接口电路，如位置控制单元、PLC 接口、主轴控制单元、速度控制单元、穿孔机和纸带阅读机接口以及其他接口等。单 CPU 结构的 CNC 系统框图如图 3-4 所示。

CPU 主要承担控制和运算两方面的功能。控制功能包括：内部控制，对零件加工程序的 I/O 控制，对机床加工现场状态信息的记录控制等。运算功能完成一系列的数据处理工作：译码、刀具补偿计算、运动轨迹计算、插补运算和位置控制的给定值与反馈值的比较运算等。

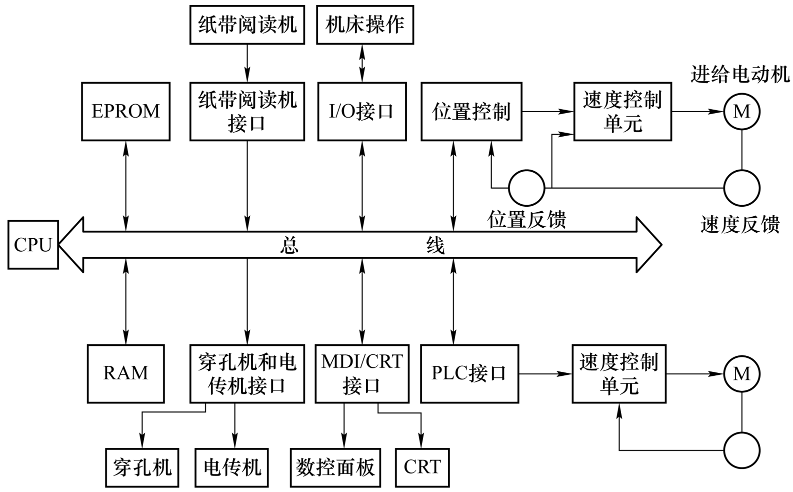


图 3-4　单 CPU 结构的 CNC 系统框图

单 CPU 结构的 CNC 系统通常采用总线结构。总线是微处理器赖以工作的物理导线，按其功能可以分为三组总线，即数据总线（DB）、地址总线（AB）和控制总线（CB）。

CNC 装置中的存储器包括只读存储器（ROM）和随机存储器（RAM）两种。系统程序存放在只读存储器（ROM）中，由生产厂家固化，即使断电，程序也不会丢失。系统程序只能读出，不能写入。运算的中间结果，需要显示的数据，运行中的状态、标志信息等存放在随机存储器（RAM）中。它可以随时读出和写入，断电后，信息就消失。加工的零件程序、机床参数、刀具参数等存放在有后备电池的 CMOS RAM 中，或者存放在磁盘存储器中，这些信息在这种存储器中能随机读出，还可以根据操作需要写入或修改，断电后，信息仍然保存。

单 CPU 结构 CNC 系统的特点是：CNC 系统的所有功能都是通过一个 CPU 进行集中控制、分时处理来实现的；该 CPU 通过总线与存储器、I/O 控制元件等各种接口电路相连，构成 CNC 系统的硬件；结构简单，易于实现；由于只有一个 CPU 的控制，功能受字长、数据宽度、寻址能力和运算速度等因素的限制。

3.2.2　多 CPU 结构 CNC 系统

多 CPU 结构 CNC 系统是指在 CNC 系统中有两个或两个以上的 CPU 能控制系统总线或主存储器进行工作的系统结构。

现代的 CNC 系统大多采用多 CPU 结构。在这种结构中，每个 CPU 完成系统中规定的一部分功能，独立执行程序，它与单 CPU 结构相比，提高了计算机的处理速度。多 CPU 结构的 CNC 系统采用模块化设计，使软件和硬件形成一定的功能模块。模块间有明确的符合工业标准的接口，彼此间可以进行信息交换。这样可以形成模块化结构，缩短了设计制造周期，并且具有良好的适应性和扩展性，结构紧凑。多 CPU 结构的 CNC 系统由于每个 CPU 分管各自的任务，形成若干个模块，即使某个模块出了故障，其他模块仍能照常工作，并且更换方便，可以使故障对系统的影响减少，提高了可靠性；性价比高，适合于多轴控制、高进给速度、高精度的数控机床。

1. 多 CPU 结构 CNC 系统的典型结构

（1）共享总线结构　在这种结构的 CNC 系统中，只有主模块有权控制系统总线，且在某一时刻只能有一个主模块占有总线，如有多个主模块同时请求使用总线会产生竞争总线问题。

共享总线结构的各模块之间的通信，主要依靠存储器实现，采用公共存储器的方式。公共存储器直接插在系统总线上，有总线使用权的主模块都能访问，可供任意两个主模块交换信息，其结构框图如图 3-5 所示。

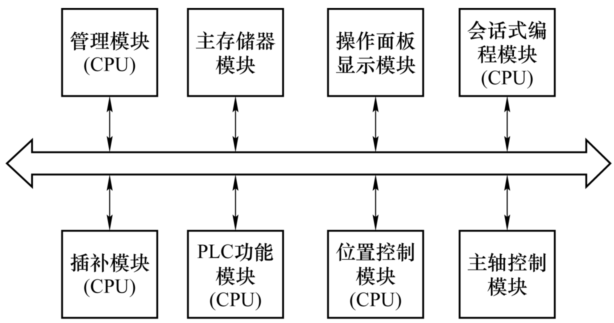


图 3-5　共享总线的多 CPU 结构的 CNC 系统结构框图

（2）共享存储器结构　在该结构中，采用多端口存储器来实现各 CPU 之间的互联和通信，每个端口都配有一套数据、地址、控制线，以供端口访问，由多端控制逻辑电路解决访问冲突，如图 3-6 所示。

当 CNC 系统功能复杂要求 CPU 数量增多时，会因争用共享存储器而造成信息传输的阻塞，降低系统的效率，其功能扩展较为困难。

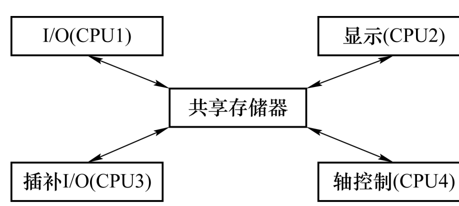


图 3-6　共享存储器的多 CPU 结构框图

2. 多 CPU 结构 CNC 系统基本功能模块

1）管理模块。该模块是管理和组织整个 CNC 系统工作的模块，主要功能包括：初始化、中断管理、总线裁决、系统出错识别和处理、系统硬件与软件诊断等。

2）插补模块。该模块用于在完成插补前，进行零件程序的译码、刀具补偿、坐标位移量计算、进给速度处理等，然后进行插补计算，并给定各坐标轴的位置值。

3）位置控制模块。对坐标位置给定值与由位置检测装置测到的实际位置值进行比较并获得差值，进行自动加减速、回基准点、对伺服系统滞后量进行监视和漂移补偿，最后得到速度控制的模拟电压（或速度的数字量），驱动进给电动机。

4）PLC 模块。零件程序的开关量（S、M、T）和机床操作面板的信号在这个模块中进行逻辑处理，实现机床电气设备的起、停控制，刀具交换，转台分度，工件数量和运转时间的计数等。

5）命令与数据 I/O 模块。指零件程序、参数和数据，各种操作指令的 I/O，以及显示所需要的各种接口电路。

6）存储器模块。指程序和数据的主存储器，或功能模块数据传送用的共享存储器。

3.3　CNC 系统的软件结构

CNC 系统的软件是为完成 CNC 系统的各项功能而专门设计和编制的，是数控加工系统的一种专用软件，又称为系统软件（系统程序）。CNC 系统软件的管理作用类似于计算机的操作系统的管理功能。不同的 CNC 装置，其功能和控制方案也不同，因而各 CNC 系统软件在结构上和规模上差别较大，各厂家的软件互不兼容。现代数控机床的功能大都采用软件来实现，所以，CNC 系统软件的设计及功能是 CNC 系统的关键。

3.3.1　CNC 系统的软硬件分工

在 CNC 系统中，软件和硬件在逻辑上是等价的，即由硬件完成的工作原则上也可以由软件来完成。但是它们各有特点：硬件处理速度快，造价相对较高，适应性差；软件设计灵活、适应性强，但是处理速度慢。因此，CNC 系统中软、硬件的分配比例是由性价比决定的，这也在很大程度上涉及软、硬件的发展水平。一般说来，软件结构首先要受到硬件的限制，但也有独立性。对于相同的硬件结构，可以配备不同的软件结构。实际上，现代 CNC 系统中软、硬件功能界面并不是固定不变的，而是随着软、硬件的水平和成本，以及 CNC 系统所具有的性能不同而变化的。图 3-7 给出了不同时期和不同产品中的 3 种典型的 CNC 系统软、硬件功能界面。

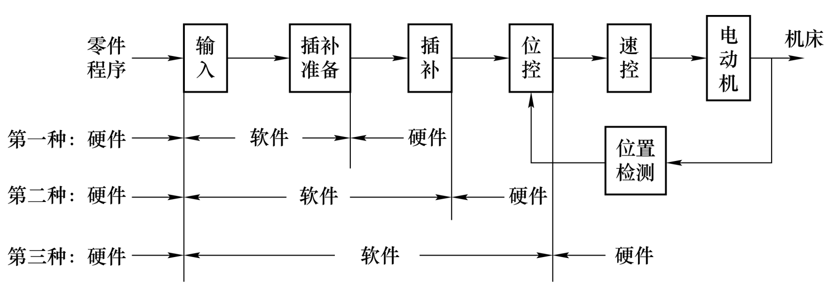


图 3-7　CNC 系统中三种典型的软、硬件功能界面

3.3.2　CNC 系统的软件结构特点

1. CNC 系统的多任务性

CNC 系统作为一个独立的数字运算控制器应用于工业自动化生产中，其多任务性表现在它的管理软件必须完成系统管理和系统控制两大任务。其中系统管理包括输入、I/O 处理、通信、显示、诊断以及加工程序的编制管理等。系统控制部分包括译码、刀具补偿、速度处理、插补和位置控制等软件，如图 3-8 所示为 CNC 系统软件任务分解图。

同时，CNC 系统的这些任务必须协调完成，也就是说在许多情况下，管理和控制的某些工作必须同时进行。例如，为了便于操作人员能及时掌握 CNC 系统的工作状态，管理软件中的显示模块必须与控制模块同时运行；当 CNC 系统处于数控工作方式时，管理软件中的零件程序输入模块必须与控制模块同时运行。而控制模块运行时，其中一些处理模块也必须同时运行。如为了保证加工过程的连续性，即刀具在各程序段间不停刀，译码、刀具补偿和速度处理模块必须与插补模块同时运行，而插补又必须要与位置控制同时进行等，这种任务并行处理关系如图 3-9 所示。

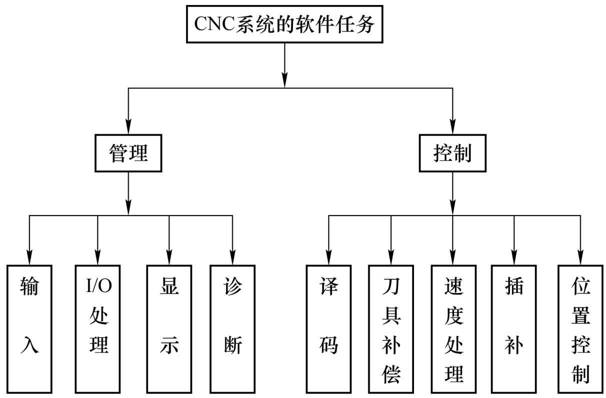


图 3-8　CNC 系统软件任务分解图

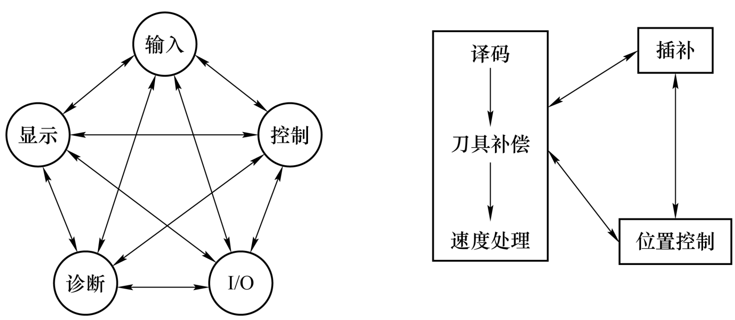


图 3-9　CNC 系统软件的任务并行处理关系需求

事实上，CNC 系统是一个专用的实时多任务计算机系统，其软件必然会融合现代计算机软件技术中的许多先进技术，其中最突出的是多任务并行处理和多重实时中断技术。

2. 并行处理

并行处理是指计算机在同一时刻或同一时间间隔内完成两种或两种以上性质相同或不相同的工作。并行处理的优点是提高了运行速度。

并行处理可分为资源重复法、时间重叠法和资源共享法等方法。

目前 CNC 装置的硬件结构中，广泛使用“资源重复”的并行处理技术。如采用多 CPU 的体系结构来提高系统的速度。而在 CNC 装置的软件中，主要采用“资源分时共享”和“时间重叠的流水处理”方法。

（1）时间重叠流水并行处理方法　在单 CPU 结构的 CNC 装置中，要采用 CPU 分时共享的原则来解决多任务的同时运行问题。各个任务何时占用 CPU 及各个任务占用 CPU 时间的长短，是首先要解决的两个时间分配的问题。在 CNC 装置中，各任务占用 CPU 的问题采用循环轮流和中断优先相结合的办法来解决。如图 3-10 所示为一个典型的 CNC 装置各任务分时共享 CPU 的时间分配。

系统在完成初始化任务后自动进入时间分配循环中，在环中依次轮流处理各任务。对于系统中一些实时性很强的任务则按优先级排队，分别处于不同的中断优先级上作为环外任务，环外任务可以随时中断环内各任务的执行。每个任务允许占用 CPU 的时间受到一定的

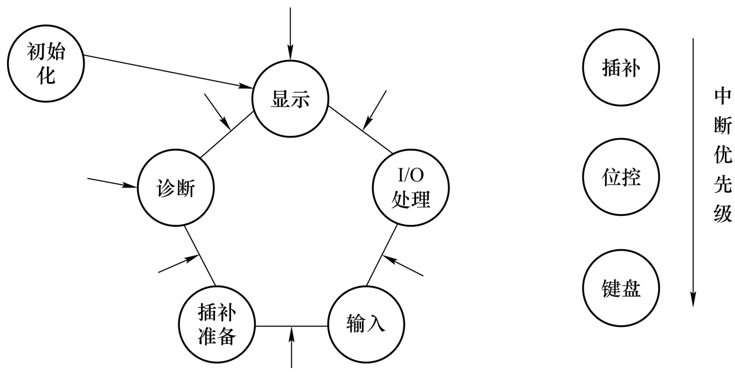


图 3-10 分时共享 CPU 和中断优先级

限制，对于某些占用 CPU 时间较长的任务，如插补准备（包括译码、刀具半径补偿和速度处理等），可以在其中的某些地方设置断点，当程序运行到断点处时，自动让出 CPU，等到下一个运行时间内自动跳到断点处继续运行。

（2）资源重叠流水并行处理方法　当 CNC 装置在自动加工工作方式时，其数据的转换过程将由零件程序输入、插补准备（包括译码、刀具补偿计算和速度处理等）、插补、位置控制 4 个子过程组成。如果每个子过程的处理时间分别为 Δt_1、Δt_2、Δt_3、Δt_4，那么一个零件程序段的数据转换时间将是 $t=\Delta t_1+\Delta t_2+\Delta t_3+\Delta t_4$。如果以顺序方式处理每个零件的程序段，则第一个零件程序段处理完以后再处理第二个程序段，依次类推。图 3-11a 表示了这种顺序处理时的时间空间关系。从图中可以看出，这种顺序方式处理的结果将导致在两个程序段的输出之间产生时间间隔。这种时间间隔反映在电动机上就是电动机的时停时转，反映在刀具上就是刀具的时走时停，这种情况在加工工艺上是不允许的。

消除这种间隔的方法是用时间重叠流水并行处理技术。采用流水并行处理后的时间空间关系如图 3-11b 所示。

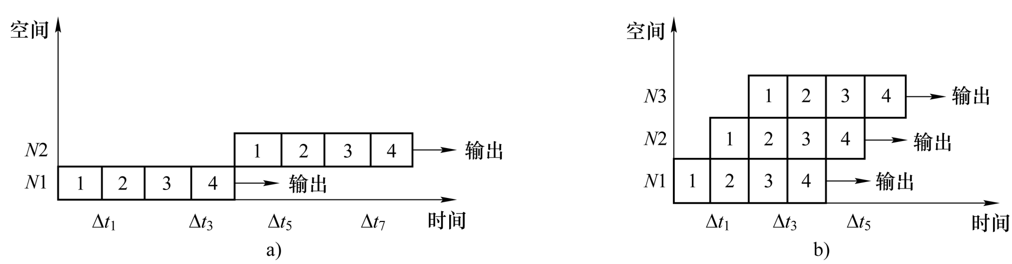


图 3-11 时间重叠流水并行处理

流水并行处理的关键是时间重叠，即在一段时间间隔内不是处理一个子过程，而是处理两个或更多的子过程。从图 3-11 中可以看出，经过流水并行处理以后，从时间 Δt_4 开始，每个程序段的输出之间不再有间隔，从而保证了刀具移动的连续性。流水并行处理要求处理每个子过程的运算时间相等，然而 CNC 装置中每个子过程所需的处理时间都是不同的，解决的方法是取最长的子过程处理时间为流水并行处理时间间隔。这样在处理时间间隔较短的子过程时，当处理完后系统就进入等待状态。

在单 CPU 结构的 CNC 装置中，流水并行处理的时间重叠只有宏观上的意义。即在一段

时间内，CPU 处理多个子过程，但从微观上看，每个子过程分时占用 CPU 时间。

3. 实时中断处理

CNC 系统软件结构的另一个特点是实时中断处理。CNC 系统程序以零件加工为对象，每个程序段中有许多子程序，它们按照预定的顺序反复执行，各步骤间关系十分密切，有许多子程序的实时性很强，这就决定了中断成为整个系统不可缺少的重要组成部分。CNC 系统的中断管理主要由硬件完成，而系统的中断结构决定了软件结构。

（1）CNC 系统的中断类型

1）外部中断。主要有纸带光电阅读机中断、外部监控中断（如急停、量仪到位等）和键盘及操作面板输入中断。前两种中断的实时性要求很高，将它们放在较高的中断优先级上，而键盘及操作面板输入中断则放在较低的中断优先级上。

2）内部定时中断。主要有插补周期定时中断和位置采样定时中断。在有些系统中将两种定时中断合二为一。但是在处理时，总是先处理位置控制，然后处理插补运算。

3）硬件故障中断。它是各种硬件故障检测装置发出的中断。如存储器出错、定时器出错、插补运算超时等。

4）程序性中断。它是程序中出现异常情况的报警中断。如：各种溢出、除零等。

（2）CNC 系统中断的结构模式

1）中断型结构模式。中断型结构模式的特点是除了初始化程序之外，整个系统软件的各种功能模块分别安排在不同级别的中断服务程序中，整个软件就是一个大的中断系统。其管理的功能主要通过各级中断服务程序之间的相互通信来实现。

2）前后台型结构模式。该结构模式的 CNC 系统的软件分为前台程序和后台程序。前台程序是指实时中断服务程序，实现插补、伺服、机床监控等实时功能，这些功能与机床的动作直接相关。后台程序是一个循环运行程序，它包括管理软件和插补准备程序。后台程序运行时，实时中断程序不断插入，与后台程序相配合，共同完成零件加工任务。如图 3-12 所示是前后台型结构程序关系图。

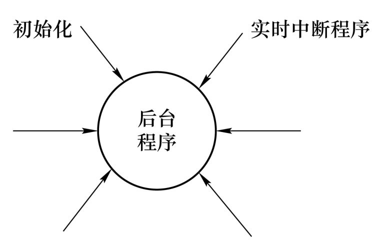


图 3-12　前后台型结构

3.4　CNC 装置的插补原理

3.4.1　概述

数控机床上进行轨迹加工的各种工件，大部分由直线和圆弧构成，因此大多数数控装置都具有直线和圆弧的插补功能。对于非直线、非圆弧组成的轨迹，可以用一小段直线或圆弧来拟合。数控车床还具有螺纹车削功能。编程员编制的数控加工程序，经过数控装置输入处理后，将得到刀具移动轨迹直线的起点和终点坐标、圆弧的起点和终点坐标，逆圆还是顺圆以及圆心相对于起点的偏移量或圆弧半径。插补的任务就是按照进给速度的要求，在轮廓起点和终点之间计算出若干中间点的坐标值。由于每个中间点计算的时间直接影响数控装置的控制速度，而插补中间点的计算精度又影响到整个数控系统的精度，所以插补算法对整个数控系统的性能至关重要，也就是说数控装置控制软件的核心是插补。研究出一套简单而有效

的插补算法是人们追求的目标。目前使用的插补算法有两类：一类是脉冲增量插补；另一类是数据采样插补。

1. 脉冲增量插补

脉冲增量插补算法主要为各坐标轴进行脉冲分配计算。其特点是每次插补结束仅产生一个行程增量，以一个个脉冲的形式输出给各进给轴的伺服电动机。一个脉冲所产生的进给轴移动量叫脉冲当量，用 δ 表示。脉冲当量是脉冲分配计算的基本单位，根据加工精度选择，普通机床取 $\delta = 0.01\text{mm}$，较为精密的机床取 $\delta = 1\mu\text{m}$ 或 $0.1\mu\text{m}$。插补误差不得大于一个脉冲当量。

这种插补方法控制精度和进给速度较低，因此主要运用于以步进电动机为驱动装置的开环控制系统中。

2. 数据采样插补

数据采样插补又称时间标量插补或数字增量插补。这类插补算法的特点是数控装置产生的不是单个脉冲，而是数字量。插补运算分两步完成。第一步为粗插补，它是在给定起点和终点的曲线之间插入若干个点，即用若干条微小直线段来逼近给定曲线，每一微小直线段的长度 ΔL 都相等，且与给定进给速度有关。粗插补的每一微小直线段的长度 ΔL 与进给速度 F 和插补周期 T 有关，即 $\Delta L = FT$。第二步为精插补，它是在粗插补算出的每一微小直线上再作“数据点的密化”工作，这一步相当于对直线的脉冲增量插补。

数据采样插补方法适用于闭环和半闭环的以直流或交流伺服电动机为驱动装置的位置采样控制系统。粗插补在每个插补周期内计算出坐标位置增量值，而精插补则在每个采样周期内，采样闭环或半闭环反馈位置增量值及插补输出的指令位置增量值，然后算出各坐标轴相应的插补指令位置和实际反馈位置，并将二者相比较，求得跟随误差。根据所求得的跟随误差算出相应轴的进给速度指令，并输出给驱动装置。在实际使用中，粗插补运算简称为插补，通常用软件实现。而精插补可以用软件，也可以用硬件来实现。插补周期与采样周期可以相等，也可以不等，通常插补周期是采样周期的整数倍。

3.4.2　脉冲增量插补

脉冲增量插补就是分配脉冲的计算，在插补过程中不断向各坐标轴发出相互协调的进给脉冲，控制机床坐标轴作相应的移动。

脉冲增量插补算法通常有以下几种方法：逐点比较法、数字积分法、比较积分法、矢量判断法、最小偏差法、数字脉冲乘法器法等。

脉冲增量插补适用于以步进电动机为驱动装置的开环数控系统。

1. 逐点比较法插补

逐点比较法的基本原理是被控对象在按要求的轨迹运动时，每走一步都要与规定的轨迹进行比较，由比较结果决定下一步移动的方向。逐点比较法既可以作直线插补又可以作圆弧插补。这种算法的特点是，运算直观，插补误差小于一个脉冲当量，输出脉冲均匀，而且输出脉冲的速度变化小，调节方便，因此在两坐标数控机床中应用较为普遍。

（1）逐点比较法直线插补

1）逐点比较法的直线插补原理。在如图 3-13 所示 XOY 平面第一象限内有直线段 OE 以坐标原点为起点，以 $E(x_e, y_e)$ 为终点，直线方程为

$$\frac{y}{x}=\frac{y_e}{x_e}$$

改写为 $yx_e-xy_e=0$

如果加工轨迹脱离直线，则轨迹点的 x、y 坐标不满足上述直线方程。在第一象限中，对位于直线上方的点 A，则有

$$y_a x_e - x_a y_e > 0$$

对位于直线下方的点 B，则有

$$y_b x_e - x_b y_e < 0$$

因此可以取判别函数 F 来判断点与直线的相对位置，

$$F = yx_e - xy_e$$

当加工点落在直线上时，$F=0$；

当加工点落在直线上方时，$F>0$；

当加工点落在直线下方时，$F<0$。

称 $F=yx_e-xy_e$ 为直线插补偏差判别式或偏差判别函数，F 的数值称为偏差。

例如图 3-14 所示为待加工直线 OA，运用下述法则，根据偏差判别式，求得图中近似直线（由折线组成）。若刀具加工点的位置 $P(x_i, y_j)$ 处在直线上方（包括在直线上），即满足 $F_{i,j}\geqslant 0$ 时向 x 轴方向发出一个正向运动的进给脉冲（$+\Delta x$），使刀具沿 x 轴坐标移动一步（一个脉冲当量 δ），逼近直线；若刀具加工点的位置 $P(x_i, y_j)$ 处在直线下方，即满足 $F_{i,j}<0$ 时，向 y 轴发出一个正向运动的进给脉冲（$+\Delta y$），使刀具沿 y 轴移动一步逼近直线。

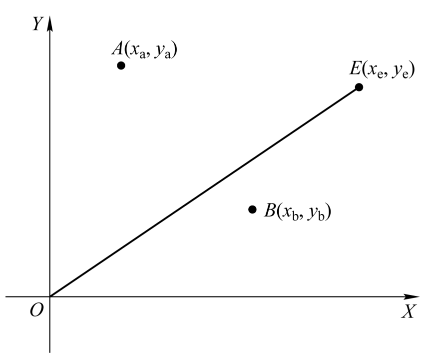


图 3-13　第一象限直线插补

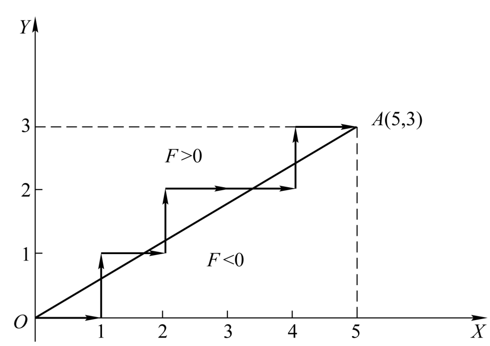


图 3-14　直线插补轨迹

但是按照上述法则进行运算判别，要求每次进行判别式 $F_{i,j}$ 运算，即乘法与减法运算，这在具体电路或程序中实现不是很方便。一个简便的方法是：每走一步到新加工点，加工偏差用前一点的加工偏差递推出来，这种方法称为“递推法”。

若 $F_{i,j}\geqslant 0$ 时，则向 x 轴发出一进给脉冲，刀具从这点向 x 方向迈进一步，新加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$ 的偏差值为

$$F_{i+1,j}=x_e y_j-(x_i+1)y_e=x_e y_j-x_i y_e-y_e=F_{i,j}-y_e$$

即
$$F_{i+1,j}=F_{i,j}-y_e \tag{3-1}$$

如果某一时刻加工点 $P(x_i, y_j)$ 的 $F_{i,j}<0$ 时，则向 y 轴发出一进给脉冲，刀具从这点

向 y 方向迈进一步，新加工点 $P(x_i, y_{j+1})$ 的偏差值为

$$F_{i,j+1} = x_e(y_j + 1) - x_i y_e = x_e y_j - x_i y_e + x_e = F_{i,j} + x_e$$

即

$$F_{i,j+1} = F_{i,j} + x_e \tag{3-2}$$

根据式（3-1）及式（3-2）可以看出，新加工点的偏差值完全可以用前一点的偏差递推出来。

2）节拍控制和运算程序流程图。直线插补的节拍控制：综上所述，逐点比较法直线插补的全过程，每走一步要进行以下四个节拍。

第一节拍为偏差判别：判别刀具当前位置相对于给定轮廓的偏离情况，以此决定刀具移动方向。

第二节拍为进给：根据偏差判别结果，控制刀具相对于工件轮廓进给一步，即向给定的轮廓靠拢，减小偏差。

第三节拍为偏差计算：由于刀具进给已改变了位置，因此应计算出刀具当前位置的新偏差，为下一次判别作准备。

第四节拍为终点判别：判别刀具是否已到达被加工轮廓线段的终点。若已到达终点，则停止插补。若未到达终点，则继续插补。如此不断重复上述四个节拍就可以加工出所要求的轮廓。

3）不同象限的直线插补。对第二象限，只要用 $|x|$ 取代 x，就可以变换到第一象限，至于输出驱动，应使 x 轴向步进电动机反向旋转，而 y 轴步进电动机仍为正向旋转。

同理，第三、四象限的直线也可以变换到第一象限。插补运算时，用 $|x|$ 和 $|y|$ 代替 x、y。输出驱动则是：在第三象限，点在直线上方，向 $-y$ 方向进给，点在直线下方，向 $-x$ 方向进给；在第四象限，点在直线上方，向 $-y$ 方向进给，点在直线下方，向 $+x$ 方向进给。四个象限的进给方向如图 3-15 所示。

现将直线四种情况的偏差计算及进给方向列于表 3-1 中，其中用 L 表示直线，四个象限分别用数字 1、2、3、4 标注。

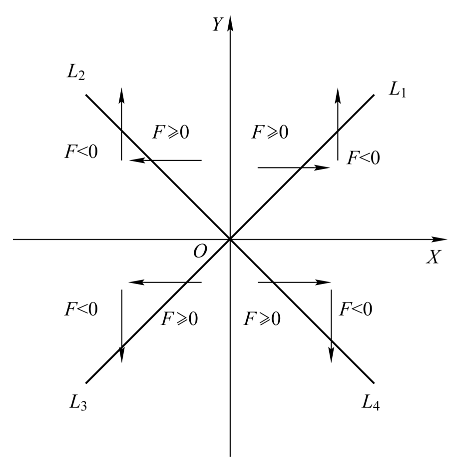


图 3-15　直线插补在四个象限中的进给方向

表 3-1　*XY* 平面内直线插补的进给与偏差计算

线　型	偏　差	偏 差 计 算	进给方向与坐标
L_1，L_4	$F \geq 0$	$F \leftarrow F - \lvert y_e \rvert$	$+\Delta x$
L_2，L_3	$F \geq 0$		$-\Delta x$
L_1，L_2	$F < 0$	$F \leftarrow F + \lvert x_e \rvert$	$+\Delta y$
L_3，L_4	$F < 0$		$-\Delta y$

4）直线插补举例

【例 3.1】　设加工第一象限直线 OA，如图 3-14 所示，终点坐标为 $x_e = 5$，$y_e = 3$，试用

逐点比较法插补该直线。

解：总步数 $n=5+3=8$

开始时刀具在直线起点，即在直线上，故 $F_0=0$。表 3-2 列出了直线插补运算过程，插补轨迹如图 3-14 所示。

表 3-2　直线插补运算过程

序　号	偏差判别	进　给	偏差计算	终点判别
0	—	—	$F_0=0$	$n=5+3=8$
1	$F_0=0$	$+\Delta x$	$F_1=F_0-y_e=0-3=-3$	$n=8-1=7$
2	$F_1<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+x_e=-3+5=2$	$n=7-1=6$
3	$F_2>0$	$+\Delta x$	$F_3=F_2-y_e=2-3=-1$	$n=6-1=5$
4	$F_3<0$	$+\Delta y$	$F_4=F_3+x_e=-1+5=4$	$n=5-1=4$
5	$F_4>0$	$+\Delta x$	$F_5=F_4-y_e=4-3=1$	$n=4-1=3$
6	$F_5>0$	$+\Delta x$	$F_6=F_5-y_e=1-3=-2$	$n=3-1=2$
7	$F_6<0$	$+\Delta y$	$F_7=F_6+x_e=-2+5=3$	$n=2-1=1$
8	$F_7>0$	$+\Delta x$	$F_8=F_7-y_e=3-3=0$	$n=1-1=0$

（2）逐点比较法圆弧插补

1）逐点比较法的圆弧插补原理。加工一个圆弧，很容易令人想到用加工点到圆心的距离与该圆弧的名义半径相比较来反映加工偏差。设要加工如图 3-16 所示的第一象限逆时针走向的圆弧 AB，半径为 R，以原点为圆心，起点坐标为 $A(x_0,\ y_0)$，在 XOY 坐标平面第一象限中，点 $P(x_i,\ y_j)$ 的加工偏差有以下 3 种情况：

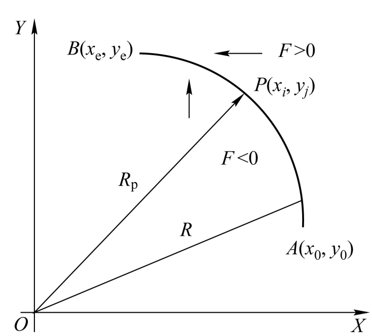


图 3-16　逐点比较法圆弧插补

若加工点 $P(x_i,\ y_j)$ 正好落在圆弧上，则下式成立，即

$$x_i^2+y_j^2=x_0^2+y_0^2=R^2$$

若加工点 $P(x_i,\ y_j)$ 落在圆弧外侧，则 $R_p>R$，即

$$x_i^2+y_j^2>x_0^2+y_0^2$$

若加工点 $P(x_i,\ y_j)$ 落在圆弧内侧，则 $R_p<R$，即

$$x_i^2+y_j^2<x_0^2+y_0^2$$

将上面各式分别改写为下列形式，即

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)=0 \qquad （在圆弧上）$$

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)>0 \qquad （在圆弧外侧）$$

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)<0 \qquad （在圆弧内侧）$$

取加工偏差判别式为

$$F_{i,j}=(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)$$

若点 $P(x_i,\ y_j)$ 在圆弧外侧或圆弧上，即满足 $F_{i,j}\geqslant 0$ 的条件时，向 x 轴发出一负向运动的进给脉冲（$-\Delta x$）；若点 $P(x_i,\ y_j)$ 在圆弧内侧，即满足 $F_{i,j}<0$ 的条件时，则向 y 轴发

出一正向运动的进给脉冲（$+\Delta y$）。为了简化偏差判别式的运算，仍用递推法来推算下一步新的加工偏差。

设加工点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧外侧或在圆弧上，则加工偏差为

$$F_{i,j}=(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)\geqslant 0$$

故 x 轴必须向负向进给一步（$-\Delta x$），移到新的加工点 $P(x_{i+1}, y_j)$，其加工偏差为

$$\begin{aligned}F_{i+1,j}&=(x_i-1)^2-x_0^2+y_j^2-y_0^2=x_i^2-2x_i+1+y_j^2-y_0^2-x_0^2\\&=F_{i,j}-2x_i+1\end{aligned} \tag{3-3}$$

设加工点 $P(x_i, y_j)$ 在圆弧的内侧，则 $F_{i,j}<0$。那么 y 轴须向正向进给一步（$+\Delta y$），移到新的加工点 $P(x_i, y_{j+1})$，其加工偏差为

$$\begin{aligned}F_{i,j+1}&=x_i^2-x_0^2+(y_i+1)^2-y_0^2=x_i^2-x_0^2+y_j^2+2y_i+1-y_0^2\\&=F_{i,j}+2y_i+1\end{aligned} \tag{3-4}$$

根据式（3-3）及式（3-4）可以看出，新加工点的偏差值可以用前一点的偏差值递推出来。递推法把圆弧偏差运算式由平方运算化为加法和乘 2 运算，而对二进制来说，乘 2 运算是容易实现的。

2）圆弧插补的运算过程。圆弧插补的运算过程与直线插补的过程基本一样，不同的是，圆弧插补时，动点坐标的绝对值总是一个增大，另一个减小。如对于第一象限逆时针方向的圆来说，动点坐标的增量公式为

$$x_{i+1}=x_i-1 \qquad y_{j+1}=y_j+1$$

圆弧插补运算每进给一步也需要进行偏差判别、进给、偏差计算、终点判断四个工作节拍。运算中 F 寄存偏差值为 $F_{i,j}$；x 和 y 分别寄存 x 和 y 动点的坐标值，开始分别存放 x_0 和 y_0；n 寄存终点判别值：$n=|x_e-x_0|+|y_e-y_0|$。

3）圆弧插补举例

【例 3.2】 设有第一象限逆时针方向的圆弧 $\overset{\frown}{AB}$，起点为 $A(5, 0)$，终点为 $B(0, 5)$，用逐点比较法插补 AB。

解：

$$n=|5-0|+|0-5|=10$$

开始加工时刀具在起点，即在圆弧上，$F_0=0$。圆弧插补运算过程见表 3-3，插补轨迹如图 3-17 所示。

表 3-3　圆弧插补运算过程

序　号	偏差判别	进　给	偏差计算		终点判别
0	—	—	$F_0=0$	$x_0=5,\ y_0=0$	$n=10$
1	$F_0=0$	$-\Delta x$	$F_1=F_0-2x+1=0-2\times5+1=-9$	$x_1=4,\ y_1=0$	$n=10-1=9$
2	$F_1<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+2y+1=-9+2\times0+1=-8$	$x_2=4,\ y_2=1$	$n=8$
3	$F_2<0$	$+\Delta y$	$F_3=-8+2\times1+1=-5$	$x_3=4,\ y_3=2$	$n=7$
4	$F_3<0$	$+\Delta y$	$F_4=-5+2\times2+1=0$	$x_4=4,\ y_4=3$	$n=6$
5	$F_4=0$	$-\Delta x$	$F_5=0-2\times4+1=-7$	$x_5=3,\ y_5=3$	$n=5$
6	$F_5<0$	$+\Delta y$	$F_6=-7+2\times3+1=0$	$x_6=3,\ y_6=4$	$n=4$
7	$F_6=0$	$-\Delta x$	$F_7=0-2\times3+1=-5$	$x_7=2,\ y_7=4$	$n=3$
8	$F_7<0$	$+\Delta y$	$F_8=-5+2\times4+1=4$	$x_8=2,\ y_8=5$	$n=2$

（续）

序　号	偏差判别	进　给	偏差计算		终点判别
9	$F_8>0$	$-\Delta x$	$F_9=4-2\times2+1=1$	$x_9=1$，$y_9=5$	$n=1$
10	$F_9>0$	$-\Delta x$	$F_{10}=1-2\times1+1=0$	$x_{10}=0$，$y_{10}=5$	$n=0$

4）圆弧插补的象限处理与坐标变换

① 圆弧插补的象限处理。上面仅讨论了第一象限的逆时针方向的圆弧插补，实际上圆弧所在的象限不同，顺逆不同，插补公式和进给方向均不同。圆弧插补有八种情况，如图 3-18所示。

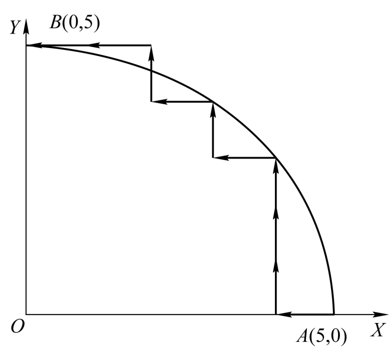


图 3-17　圆弧插补轨迹

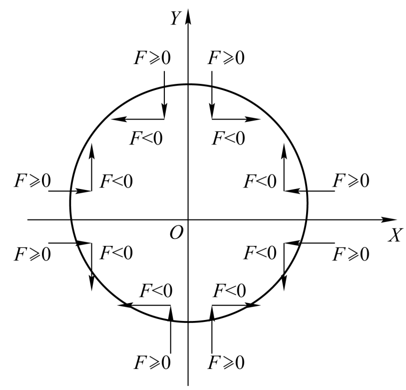


图 3-18　圆弧插补在四个象限中的进给方向

现将圆弧插补八种情况的偏差计算及进给方向列于表 3-4 中，其中用 R 表示圆弧，S 表示顺时针，N 表示逆时针，四个象限分别用数字 1、2、3、4 标注，例如 SR_1 表示第一象限顺圆，NR_3 表示第三象限逆圆。

表 3-4　*xy* 平面内圆弧插补的进给方向与偏差计算

线　型	偏　差	偏差计算	进给方向与坐标
SR_2，NR_3	$F\geqslant0$	$F\leftarrow F+2x+1$ $x\leftarrow x+1$	$+\Delta x$
SR_1，NR_4	$F<0$		
NR_1，SR_4	$F\geqslant0$	$F\leftarrow F-2x+1$ $x\leftarrow x-1$	$-\Delta x$
NR_2，SR_3	$F<0$		
NR_4，SR_3	$F\geqslant0$	$F\leftarrow F+2y+1$ $y\leftarrow y+1$	$+\Delta y$
NR_1，SR_2	$F<0$		
SR_1，NR_2	$F\geqslant0$	$F\leftarrow F-2y+1$ $y\leftarrow y-1$	$-\Delta y$
NR_3，SR_4	$F<0$		

② 圆弧自动过象限。所谓圆弧自动过象限，是指圆弧的起点和终点不在同一象限内，如图 3-19 所示。为实现一个程序段的完整功能，需设置圆弧自动过象限功能。

要完成过象限功能，首先应判别何时过象限。过象限有一显著特点，就是过象限时正好是圆弧与坐标轴相交的时刻，因此在两个坐标值中必有一个为零，判断是否过象限只要检查是否有坐标值为零即可。

过象限后，圆弧线型也改变了，以图 3-19 为例，由 SR_2 变为 SR_1。但过象限时象限的转换是有一定规律的。当圆弧起点在第一象限时，逆时针圆弧过象限后转换顺序是 $NR_1 \to NR_2 \to NR_3 \to NR_4 \to NR_1$，每过一次象限，象限顺序号加 1，当从第四象限向第一象限过象限时，象限顺序号从 4 变为 1；顺时针圆弧过象限的转换顺序是 $SR_1 \to SR_4 \to SR_3 \to SR_2 \to SR_1$，即每过一次象限，象限顺序号减 1，当从第一象限向第四象限过象限时，象限顺序号从 1 变为 4。

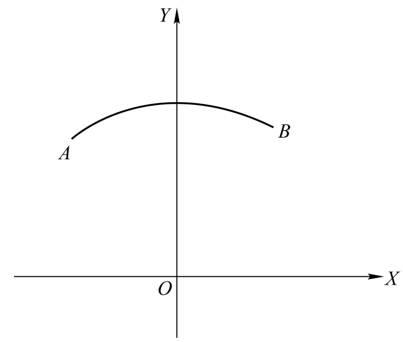


图 3-19　圆弧过象限

（3）坐标变换　前面所述的逐点比较法插补是在 XY 平面中讨论的。对于其他平面的插补可采用坐标变换方法实现。用 y 代替 x，z 代替 y，即可实现 YZ 平面内的直线和圆弧插补；用 z 代替 y 而 x 坐标不变，就可以实现 XZ 平面内的直线与圆弧插补。

2. 数字积分法插补

（1）数字积分法的基本原理　数字积分法又称数字微分分析法（Digital Differential Analyzer，DDA）。这种插补方法可以实现一次、二次、甚至高次曲线的插补，也可以实现多坐标联动控制。只要输入不多的几个数据，就能加工出圆弧等形状较为复杂的轮廓曲线。作直线插补时，脉冲分配也较均匀。

从几何概念上来说，函数 $y=f(t)$ 的积分运算就是求函数曲线所包围的面积 S（图 3-20）。

$$S = \int_0^t y\mathrm{d}t \tag{3-5}$$

此面积可以看作是许多长方形小面积之和，长方形的宽为自变量 Δt，高为纵坐标 y_i，则

$$S = \int_0^t y\mathrm{d}t = \sum_{i=0}^{n} y_i \Delta t \tag{3-6}$$

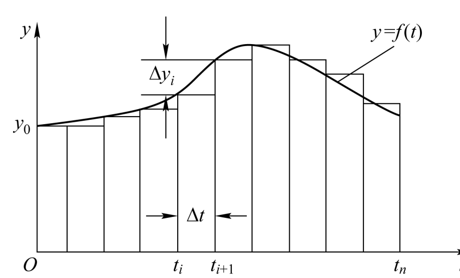


图 3-20　函数 $y=f(t)$ 的积分

这种近似积分法称为矩形积分法，该公式又称为矩形公式。数学运算时，如果取 $\Delta t = 1$，即一个脉冲当量，式（3-6）可以简化为

$$S = \sum_{i=0}^{n} y_i \tag{3-7}$$

由此，函数的积分运算变成了变量求和运算。如果所选取的脉冲当量足够小，则用求和运算来代替积分运算所引起的误差一般不会超过允许的数值。

（2）DDA 直线插补

1）DDA 直线插补原理。设 XY 平面内有直线 OA，起点（0，0），终点为（x_e，y_e），如图 3-21 所示。若以匀速 V 沿 OA 位移，则 V 可分为动点在 X 轴和 Y 轴方向的两个速度 V_x、V_y，根据前述积分原理计算公式，在 X 轴和 Y 轴方向上微小位移增量 Δx、Δy 应为

$$\begin{cases} \Delta x = V_x \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t \end{cases} \tag{3-8}$$

对于直线函数来说，V_x、V_y，V 和 L 满足下式

$$\begin{cases} \dfrac{V_x}{V} = \dfrac{x_e}{L} \\ \dfrac{V_y}{V} = \dfrac{y_e}{L} \end{cases}$$

从而有

$$\begin{cases} V_x = kx_e \\ V_y = ky_e \end{cases} \tag{3-9}$$

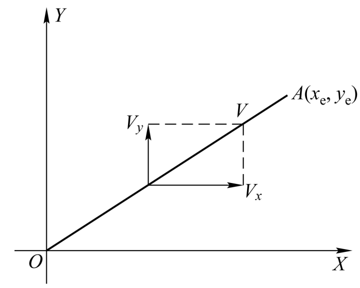


图 3-21　DDA 直线插补

式中，$k = \dfrac{V}{L}$。

因此坐标轴的位移增量为

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e \Delta t \\ \Delta y = ky_e \Delta t \end{cases} \tag{3-10}$$

各坐标轴的位移量为

$$\begin{cases} x = \int_0^t kx_e \mathrm{d}t = k\sum_{i=1}^{n} x_e \Delta t \\ y = \int_0^t ky_e \mathrm{d}t = k\sum_{i=1}^{n} y_e \Delta t \end{cases} \tag{3-11}$$

所以，动点从原点走向终点的过程，可以看作是各坐标轴每经过一个单位时间间隔 Δt，分别以增量 kx_e、ky_e同时累加的过程。据此可以作出直线插补原理图，如图 3-22 所示。

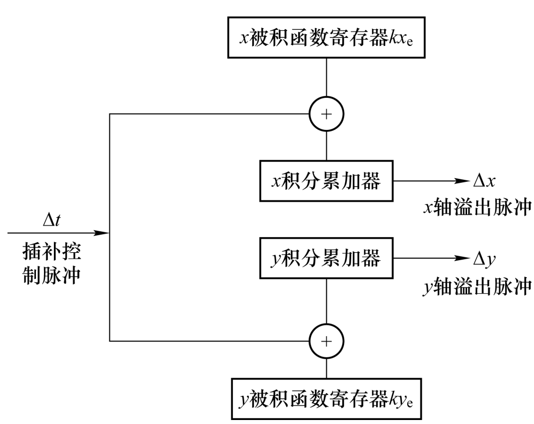


图 3-22　*XY* 平面直线插补原理

平面直线插补器由两个数字积分器组成，每个坐标的积分器由累加器和被积函数寄存器组成。终点坐标值存在被积函数寄存器中，Δt 相当于插补控制脉冲源发出的控制信号。每发生一个插补迭代脉冲（即来一个 Δt），被积函数 kx_e和 ky_e向各自的累加器里累加一次，累加的结果有无溢出脉冲 Δx（或 Δy），取决于累加器的容量和 kx_e或 ky_e的大小。

假设经过 n 次累加后（取 $\Delta t = 1$），x 和 y 分别（或同时）到达终点（x_e，y_e），则式（3-12)成立，即

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^{n} kx_e \Delta t = kx_e n = x_e \\ y = \sum_{i=1}^{n} ky_e \Delta t = ky_e n = y_e \end{cases} \tag{3-12}$$

由此得到 $nk=1$，即 $n=1/k$。

式（3-12）表明比例常数 k 和累加（迭代）次数 n 的关系，由于 n 必须是整数，所以 k 一定是小数。

k 的选择主要考虑每次增量 Δx 或 Δy 不大于 1，以保证坐标轴上每次分配进给脉冲不超过一个，也就是说，要使式（3-13）成立，应满足

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e < 1 \\ \Delta y = ky_e < 1 \end{cases} \tag{3-13}$$

若取寄存器位数为 N 位，则 x_e及 y_e的最大寄存器容量为 2^N-1，故有

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e = k(2^N-1) < 1 \\ \Delta y = ky_e = k(2^N-1) < 1 \end{cases} \tag{3-14}$$

所以

$$k < \frac{1}{2^N-1}$$

一般取

$$k < \frac{1}{2^N}$$

可满足

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e = \dfrac{2^N-1}{2^N} < 1 \\ \Delta y = ky_e = \dfrac{2^N-1}{2^N} < 1 \end{cases} \tag{3-15}$$

因此，累加次数 n 为

$$n = \frac{1}{k} = 2^N$$

因为 $k=1/2^N$，对于一个二进制数来说，使 kx_e（或 ky_e）等于 x_e（或 y_e）乘以 $1/2^N$是很容易实现的，即 x_e（或 y_e）数字本身不变，只要把小数点左移 N 位即可。所以一个 N 位的寄存器存放 x_e（或 y_e）和存放 kx_e（或 ky_e）的数字是相同的，只是后者的小数点出现在最高位数 N 前面，其他没有差异。

DDA 直线插补的终点判别较简单，因为直线程序段需要进行 2^N次累加运算，进行 2^N次累加后就一定到达终点，故可由一个与积分器中寄存器容量相同的终点计数器 J_E实现，其初值为零。每累加一次，J_E加 1，当累加 2^N次后，产生溢出，使 $J_E=0$，完成插补。

2）DDA 直线插补软件流程。用 DDA 进行插补时，x 和y 两坐标可同时进给，即可同时送出 Δx、Δy 脉冲，同时每累加一次，要进行一次终点判断。软件流程如图 3-23

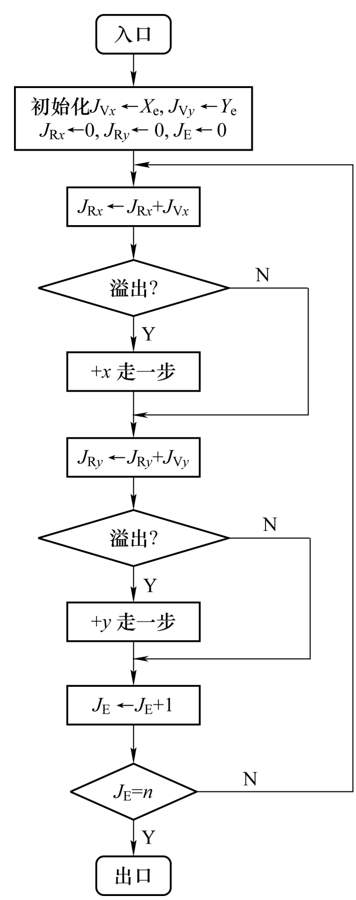


图 3-23　DDA 直线插补软件流程

所示，其中 J_{Vx}、J_{Vy} 为积分函数寄存器，J_{Rx}、J_{Ry} 为余数寄存器，J_E 为终点计数器。

3）DDA 直线插补举例

【例 3.3】 设有一直线 OA，起点在坐标原点，终点的坐标为（5，3）。试用 DDA 直线插补此直线。

解： $J_{Vx}=5$，$J_{Vy}=3$，选寄存器位数 $N=3$，则累加次数 $n=2^3=8$，运算过程见表 3-5，插补轨迹如图 3-24 所示。

表 3-5　DDA 直线插补运算过程

累加次数 n	x 积分器 $J_{Rx}+J_{Vx}$	溢出 Δx	y 积分器 $J_{Ry}+J_{Vy}$	溢出 Δy	终点判断 J_E
0	0	0	0	0	0
1	0+5=5	0	0+3=3	0	1
2	5+5=8+2	1	3+3=6	0	2
3	2+5=7	0	6+3=8+1	1	3
4	7+5=8+4	1	1+3=4	0	4
5	4+5=8+1	1	4+3=7	0	5
6	1+5=6	0	7+3=8+2	1	6
7	6+5=8+3	1	2+3=5	0	7
8	3+5=8+0	1	5+3=8+0	1	8

（3）DDA 圆弧插补

1）DDA 圆弧插补原理。从上面的叙述可知，DDA 直线插补的物理意义是使动点沿速度矢量的方向前进，这同样适合于圆弧插补。

以第一象限为例，设圆弧 $\overset{\frown}{AE}$ 半径为 R，起点 $A(x_0,\ y_0)$，终点 $E(x_e,\ y_e)$，$N(x_i,\ y_i)$ 为圆弧上的任意动点，动点移动速度为 v，分速度为 v_x 和 v_y，如图 3-25 所示。

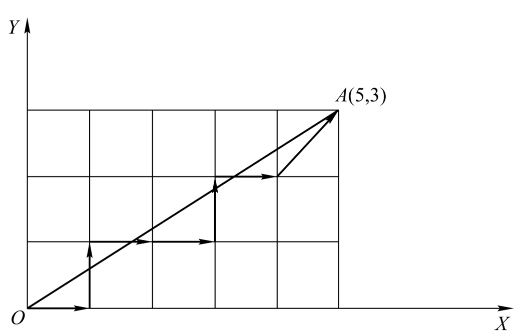


图 3-24　DDA 直线插补轨迹

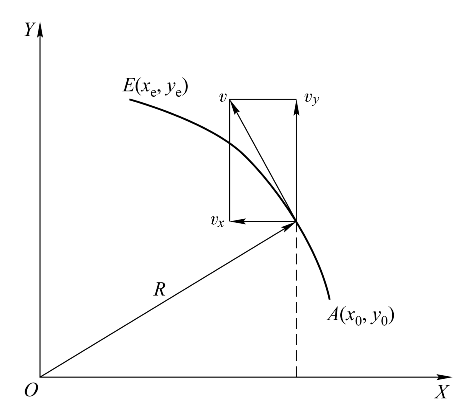


图 3-25　第一象限逆时针方向的圆 DDA 插补

圆弧方程为

$$\begin{cases} x_i = R\cos\alpha \\ y_i = R\sin\alpha \end{cases} \tag{3-16}$$

动点 N 的分速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = -v\sin\alpha = -v\dfrac{y_i}{R} = -\left(\dfrac{v}{R}\right)y_i \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t} = v\cos\alpha = v\dfrac{x_i}{R} = \left(\dfrac{v}{R}\right)x_i \end{cases} \tag{3-17}$$

在单位时间 Δt 内，x、y 位移增量方程为

$$\begin{cases} \Delta x_i = v_x\Delta t = -\left(\dfrac{v}{R}\right)y_i\Delta t \\ \Delta y_i = v_y\Delta t = \left(\dfrac{v}{R}\right)x_i\Delta t \end{cases} \tag{3-18}$$

当 v 恒定不变时，则有

$$\frac{v}{R} = k$$

式中，k 为比例常数。式（3-18）可写为

$$\begin{cases} \Delta x_i = -ky_i\Delta t \\ \Delta y_i = kx_i\Delta t \end{cases} \tag{3-19}$$

与 DDA 直线插补一样，取累加器容量为 2^N，$k=1/2^N$，N 为累加器、寄存器的位数，则各坐标的位移量为

$$\begin{cases} x = \displaystyle\int_0^t -ky\mathrm{d}t = -\frac{1}{2^N}\sum_{i=1}^{n} y_i\Delta t \\ y = \displaystyle\int_0^t kx\mathrm{d}t = \frac{1}{2^N}\sum_{i=1}^{n} x_i\Delta t \end{cases} \tag{3-20}$$

由此可构成如图 3-26 所示的 DDA 圆弧插补原理框图。

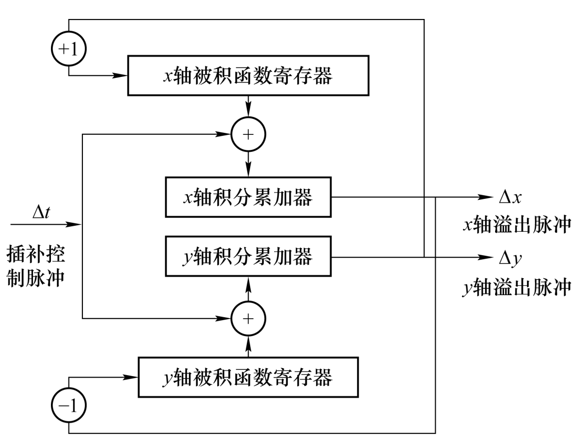


图 3-26　DDA 圆弧插补原理框图

DDA 圆弧插补与直线插补的主要区别有两点。一是坐标值 x、y 存入被积函数器 J_{Vx}、J_{Vy} 的对应关系与直线不同，即 x 不是存入 J_{Vx} 而是存入 J_{Vy}，y 不是存入 J_{Vy} 而是存入 J_{Vx}；二是 J_{Vx}、J_{Vy} 寄存器中寄存的数值与 DDA 直线插补有本质的区别：直线插补时，J_{Vx}（或 J_{Vy}）寄存的是终点坐标 x_e（或 y_e），是常数，而在 DDA 圆弧插补时寄存的是动点坐标，是变量。

因此在插补过程中，必须根据动点位置的变化来改变 J_{Vx} 和 J_{Vy} 中的内容。在起点时，J_{Vx} 和 J_{Vy} 分别寄存起点坐标 y_0、x_0。对于第一象限逆时针方向的圆来说，在插补过程中，J_{Ry} 每溢出一个 Δy 脉冲，J_{Vx} 应该加 1；J_{Rx} 每溢出一个 Δx 脉冲，J_{Vy} 应该减 1。对于其他各种情况的 DDA 圆弧插补，J_{Vx} 和 J_{Vy} 是加 1 还是减 1，取决于动点坐标所在象限及圆弧走向。

DDA 圆弧插补时，由于 x、y 方向到达终点的时间不同，需对 x、y 两个坐标分别进行终点判断。实现这一点可利用两个终点计数器 J_{Ex} 和 J_{Ey}，把 x、y 坐标所需输出的脉冲数 $|x_0-x_e|$、$|y_0-y_e|$ 分别存入这两个计数器中，x 或 y 积分累加器每输出一个脉冲，相应的减法计数器减 1，当某一个坐标的计数器为零时，说明该坐标已到达终点，停止该坐标的累加运算。当两个计数器均为零时，圆弧插补结束。

2）DDA 圆弧插补举例。

【例 3.4】 设有第一象限逆时针方向的圆弧 $\overset{\frown}{AB}$，起点 $A(5,0)$，终点 $B(0,5)$，设寄存器位数 N 为 3，试用 DDA 插补此圆弧。

解： $J_{Vx}=0$，$J_{Vy}=5$，寄存器容量为：$2^N=2^3=8$。运算过程见表 3-6，插补轨迹如图 3-27 所示。

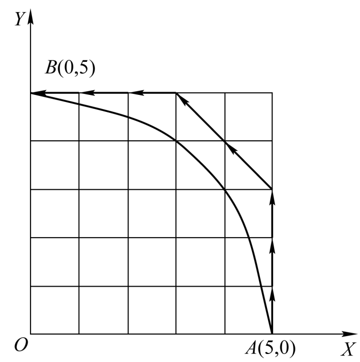


图 3-27　DDA 圆弧插补轨迹

表 3-6　DDA 圆弧插补运算过程

累加器 n	x 积分器				y 积分器			
	J_{Vx}	J_{Rx}	Δx	J_{Ex}	J_{Vy}	J_{Ry}	Δy	J_{Ey}
0	0	0	0	5	5	0	0	5
1	0	0	0	5	5	5	0	5
2	0	0	0	5	5	8+2	1	4
3	1	1	0	5	5	7	0	4
4	1	2	0	5	5	8+4	1	3
5	2	4	0	5	5	8+1	1	2
6	3	7	0	5	5	6	0	2
7	3	8+2	1	4	5	8+3	1	1
8	4	6	0	4	4	7	0	1
9	4	8+2	1	3	4	8+3	1	0
10	5	7	0	3	3	停	0	0
11	5	8+4	1	2	3	—	—	—
12	5	8+1	1	1	2	—	—	—
13	5	6	0	1	1	—	—	—
14	5	8+3	1	0	1	—	—	—
15	5	停	0	0	0	—	—	—

3）不同象限的脉冲分配。不同象限的顺时针方向圆、逆时针方向圆的 DDA 插补运算过

程和原理框图与第一象限逆时针方向圆基本一致。其不同点在于，控制各坐标轴的 Δx 和 Δy 的进给脉冲分配方向不同，以及修改 J_{Vx} 和 J_{Vy} 内容时，是“+1”还是“-1”要由 y 和 x 坐标的增减而定。各种情况下的脉冲分配方向及 ±1 修正方式见表 3-7。

表 3-7　DDA 圆弧插补时不同象限的脉冲分配及坐标修正

	SR_1	SR_2	SR_3	SR_4	NR_1	NR_2	NR_3	NR_4
J_{Vx}	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
J_{Vy}	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
Δx	+	+	-	-	-	-	+	+
Δy	-	+	+	-	+	-	-	+

3.4.3　数据采样插补

1. 概述

（1）数据采样插补的基本原理　数据采样插补又称为时间分割法，与基准脉冲插补法不同，数据采样插补法得出的不是进给脉冲，而是用二进制表示的进给量。数据采样插补由粗插补和精插补两个步骤组成。在粗插补阶段（一般数据采样插补都是指粗插补），采用时间分割的原理，首先根据编程规定的进给速度 F 和插补周期 T，将轮廓曲线分割成一段段的轮廓步长 ΔL，$\Delta L = FT$。然后计算出每个插补周期的坐标增量 ΔX 或 ΔY，进而计算出插补点（动点）的位置坐标。在精插补阶段，要根据位置反馈采样周期的大小，由伺服系统完成。也可以用基准脉冲法进行精插补。

（2）插补周期与采样周期　插补周期 T 的合理选择是数据采样插补的一个重要问题。在一个插补周期 T 内，计算机除了完成插补运算外，还要执行显示、监控、位置采样甚至精插补等多项实时任务，所以插补周期 T 必须大于插补运算时间与完成其他实时任务所需时间之和，一般为 8～10ms 左右，现代数控系统已经缩小到 2～4ms 或更小。此外，插补周期的大小还会对圆弧插补的误差产生影响。

插补周期 T 应是位置反馈采样周期的整数倍，该倍数等于轮廓步长 ΔL 实时精插补时的插补点数。例如，FANUC 7M 系统的插补周期为 8ms，位置反馈采样周期为 4ms，即插补周期为位置采样周期的 2 倍，它以内接弦进给代替圆弧插补中的弧线进给。在美国 A-B 公司的 7300 系列数控系统中，插补周期与位置反馈采样周期相同，插补算法为扩展 DDA 算法。

（3）插补精度分析

1）直线插补时，由于坐标轴的脉冲当量很小，再加上位置检测反馈的补偿，可以认为轮廓步长 ΔL 与被加工直线重合，不会造成轨迹误差。

2）圆弧插补时，一般将轮廓步长作为弦线（或切线、割线）逼近圆弧，因此存在误差。

采用弦线对圆弧进行逼近时，如图 3-28 所示。设用弦线逼近圆弧，产生的最大逼近误差为 e_r。设 δ 为在一个插补周期内逼近弦所对应的圆心角，r 为圆弧半径，则有

$$e_r = r\left(1 - \cos\frac{\delta}{2}\right) \qquad (3\text{-}21)$$

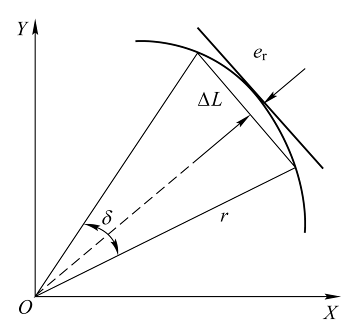


图 3-28　用弦线逼近圆弧

式（3-21）幂级数的展开式为

$$e_{\mathrm{r}}=r\left(1-\cos\frac{\delta}{2}\right)=r\left\{1-\left[1-\frac{(\delta/2)^{2}}{2!}+\frac{(\delta/2)^{4}}{4!}-\cdots\right]\right\}\approx\frac{\delta^{2}}{8}r \tag{3-22}$$

设 T 为插补周期，F 为刀具移动速度（进给速度），则进给步长为

$$\Delta L=FT$$

用进给步长 ΔL 代替弦长，有

$$\delta\approx\frac{\Delta L}{r}=\frac{TF}{r} \tag{3-23}$$

将式（3-23）代入式（3-22），得

$$e_{\mathrm{r}}=\frac{(TF)^{2}}{8r}$$

由上式可以看出，圆弧插补时，逼近误差与进给速度、插补周期的平方成正比，与圆弧半径成反比。在给定圆弧半径和弦线误差极限的情况下，插补周期应尽可能的小，以便获得尽可能大的加工速度。

2. *数据采样法直线插补*

设要加工 XY 平面上的直线 OA，其起点为坐标原点 $O(0,0)$，终点为 $A(x_{\mathrm{e}},y_{\mathrm{e}})$，刀具移动方向与 X 轴夹角 α，如图 3-29 所示。

刀具沿直线移动的速度指令为 F，设插补周期为 T，则每个插补周期的进给步长为 ΔL。由图 3-29 所示的直线可以看出，就是要算出下一单位时间间隔（插补周期）内各个坐标轴的进给量。在直线插补过程中，轮廓步长 ΔL 及其对应的坐标增量 Δx 和 Δy 是固定的，直线插补的计算过程可分为插补准备和插补计算两个步骤。

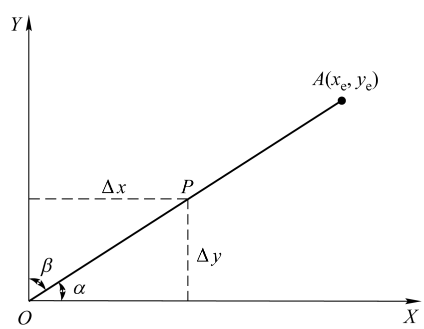


图 3-29 数据采样法直线插补

（1）插补准备 主要是计算轮廓步长 $\Delta L=FT$ 及其相应的坐标增量。

直线段 OA 长度为

$$L=\sqrt{x_{\mathrm{e}}^{2}+y_{\mathrm{e}}^{2}}$$

X 轴和 Y 轴的位移增量分别为 Δx 和 Δy，由图 3-29 可得到如下关系为

$$\begin{cases}\Delta x_{i}=\dfrac{\Delta L}{L}x_{\mathrm{e}}\\[2ex]\Delta y_{\mathrm{i}}=\Delta x_{i}\dfrac{y_{\mathrm{e}}}{x_{\mathrm{e}}}\end{cases}$$

（2）插补计算 实时计算出各插补周期中的插补点（动点）坐标值。插补第 i 点的动点坐标为

$$\begin{cases}x_{i}=x_{i-1}+\Delta x_{i}\\y_{i}=y_{i-1}+\Delta y_{i}\end{cases}$$

3. *数据采样法圆弧插补*

圆弧插补的基本思想是在满足精度要求的前提下，用弦或割线进给代替弧进给，即用直

线逼近圆弧。由于圆弧是二次曲线，所以其插补点的计算要比直线复杂得多。用直线逼近圆弧的插补算法很多，且还在发展。下面简要介绍日本 FANUC 公司 7 系统采用的直接函数法、美国 A-B 公司采用的扩展 DDA 法。

（1）直接函数法（弦线法）　在图 3-30 中，顺时针方向的圆上 B 点是继 A 点之后的瞬时插补点，坐标分别为 $A(x_i, y_i)$，$B(x_{i+1}, y_{i+1})$。由点 $A(x_i, y_i)$ 求出下一点 $B(x_{i+1}, y_{i+1})$，实质就是求在一次插补周期的时间内 X 轴和 Y 轴的进给量 Δx 和 Δy。图 3-30 中，AB 弦长等于圆弧插补时每周期的进给步长 ΔL，AP 是 A 点切线，M 是弦 AB 的中点，$OM \perp AB$，$ME \perp AF$，E 为 AF 的中点。圆心角有如下关系

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \theta$$

式中，θ 是进给步长 ΔL 对应的角增量，称为角步距。

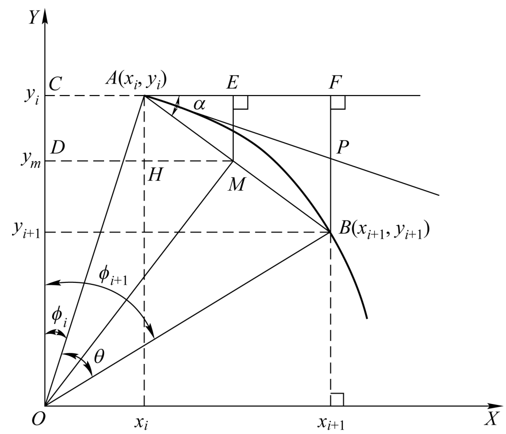


图 3-30　直线函数法圆弧插补

因为，$OA \perp AP$，所以

$$\Delta AOC \cong \Delta PAF$$

$$\angle AOC = \angle PAF = \phi_i$$

由于 AP 为切线，则

$$\angle BAP = \frac{1}{2}\angle AOB = \frac{\theta}{2}$$

$$\alpha = \angle PAF + \angle BAP = \phi_i + \frac{\theta}{2}$$

在 ΔMOD 中

$$\tan\left(\phi_i + \frac{\theta}{2}\right) = \frac{\overline{DH} + \overline{HM}}{\overline{OC} - \overline{CD}}$$

将 $\overline{DH} = x_i$，$\overline{OC} = y_i$，$\overline{HM} = \frac{1}{2}\Delta L\cos\alpha = \frac{1}{2}\Delta x$，$\overline{CD} = \frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha = \frac{1}{2}\Delta y$，带入上式，则有

$$\tan\alpha = \frac{x_i + \frac{1}{2}\Delta L\cos\alpha}{y_i - \frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha} = \frac{x_i + \frac{1}{2}\Delta x}{y_i - \frac{1}{2}\Delta y} \tag{3-24}$$

又因为 $\tan\alpha = \frac{\overline{FB}}{\overline{FA}} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$，由此可以得出 x_i、y_i 与 Δx、Δy 的关系式

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{x_i + \frac{1}{2}\Delta x}{y_i - \frac{1}{2}\Delta y} = \frac{x_i + \frac{1}{2}\Delta L\cos\alpha}{y_i - \frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha} \tag{3-25}$$

式（3-25）反映了圆弧上任意相邻两点坐标之间的关系，只要找到计算 Δx 和 Δy 的恰当方法，就可以求出新的插补点坐标为

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i, y_i = y_{i-1} - \Delta y_i$$

式中，cosα 和 sinα 均为未知，要计算 tanα 仍很困难。为此，采用一种近似算法，即以 cos45°和 sin45°来代替 cosα 和 sinα。这样，式（3-25）可改为

$$\tan\alpha \approx \frac{x_i + \frac{1}{2}\Delta L\cos45°}{y_i - \frac{1}{2}\Delta L\sin45°}$$

上式中由于采用近似算法从而造成了 tanα 的偏差，使 α 角成为 α'，cosα'变大，因而影响到 Δx 值，使之成为 $\Delta x'$，即

$$\Delta x' = \Delta L\cos\alpha' = AF'$$

但这种偏差不会使插补点离开圆弧轨迹，这是因为圆弧上任意相邻两点必须满足式（3-25）。反言之，只要在平面上任意两点的坐标及增量满足该式，则两点必在同一圆弧上。因此当已知 x_i、y_i和 $\Delta x'$时，若按式

$$\Delta y' = \frac{\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x'\right)\Delta x'}{y_i - \frac{1}{2}\Delta y'}$$

求出 $\Delta y'$，那么这样确定的 B'点一定在圆弧上。其坐标为

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i',\ y_i = y_{i-1} - \Delta y_i'$$

采用近似算法引起的偏差仅是 $\Delta x \to \Delta x'$，$\Delta y \to \Delta y'$，$AB \to AB'$和 $\Delta L \to \Delta L'$。这种算法能够保证圆弧插补每瞬时点位于圆弧上，它仅造成每次插补进给量 ΔL 的微小变化，而这种变化在实际切割加工中是微不足道的，完全可以认为插补的速度仍然是均匀的。

（2）扩展 DDA 法数据采样插补　扩展 DDA 算法是在 DDA 积分法的基础上发展起来的，它是将 DDA 法切线逼近圆弧的方法改变为割线逼近，从而大大提高圆弧插补的精度。

如图 3-31 所示，若加工半径为 R 的第一象限顺时针方向圆弧$\overset{\frown}{A_{i-1}D}$，圆心为 O 点，设刀具处在现加工点 $A_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 位置，线段 $A_{i-1}A_i$是沿被加工圆弧的切线方向的轮廓进给步长 ΔL。显然，刀具进给一个步长后，点 A_i偏离所要求的圆弧轨迹较远，径向误差较大。如果通过线段 $A_{i-1}A_i$ 的中点 B，作以 OB 为半径的圆弧的切线 BC 及 $A_{i-1}H /\!/ BC$，并在 $A_{i-1}H$ 上截取直线段 $A_{i-1}A_i'$，使 $A_{i-1}A_i' = A_{i-1}A_i = \Delta L = FT$，此时可以证明点 A_i'必定在所要求圆弧 $A_{i-1}D$ 之外。如果用直线段 $A_{i-1}A_i'$进给代替切线 $A_{i-1}A_i$的进给，会使径向误差大大减小。这种割线进给代替切线进给的插补算法称为扩展 DDA 算法。

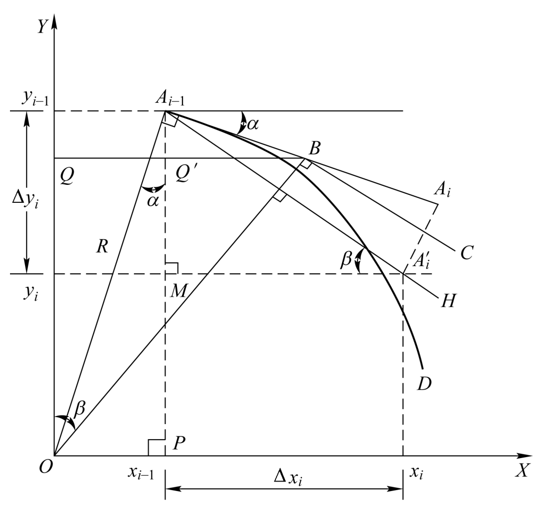


图 3-31　扩展 DDA 法圆弧插补算法

下面推导在一个插补周期 T 内，轮廓进给步长 ΔL 的坐标分量 Δx_i和 Δy_i，因为据此可以很容易求出本次插补后新加工点 A_i'的坐标位置（x_i，y_i）。

由图 3-31 可知，在直角 ΔOPA_{i-1} 中

$$\sin\alpha=\frac{\overline{OP}}{\overline{OA_{i-1}}}=\frac{x_{i-1}}{R}$$

$$\cos\alpha=\frac{\overline{A_{i-1}P}}{\overline{OA_{i-1}}}=\frac{y_{i-1}}{R}$$

过 B 点作 X 轴的平行线 BQ 交 Y 轴于 Q 点，并交 $A_{i-1}P$ 线段于点 Q'。由图 3-31 可知，直角 ΔOQB 与直角 $\Delta A_{i-1}MA_i'$ 相似，则有

$$\frac{\overline{MA_i'}}{\overline{A_{i-1}A_i'}}=\frac{\overline{OQ}}{\overline{OB}} \tag{3-26}$$

由图 3-31 得 $\overline{MA_i'}=\Delta x_i$，$\overline{A_{i-1}A_i'}=\Delta L$，在 $A_{i-1}Q'B$ 中，$\overline{A_{i-1}Q'}=\overline{A_{i-1}B}\sin\alpha=\frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha$，则

$$\overline{OQ}=\overline{A_{i-1}P}-\overline{A_{i-1}Q'}=y_{i-1}-\frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha \tag{3-27}$$

在直角 $\Delta OA_{i-1}B$ 中

$$\overline{OB}=\sqrt{(\overline{A_{i-1}B})^2+(\overline{OA_{i-1}})^2}=\sqrt{\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2+R^2} \tag{3-28}$$

将式（3-27）和式（3-28）代入式（3-26）中，得

$$\frac{\Delta x_i}{\Delta L}=\frac{y_{i-1}-\frac{1}{2}\Delta L\sin\alpha}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2+R^2}} \tag{3-29}$$

在式（3-29）中，因为 $\Delta L\ll R$，故可将 $\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2$ 略去，得

$$\Delta x_i\approx\frac{\Delta L}{R}\left(y_{i-1}-\frac{1}{2}\Delta L\frac{x_{i-1}}{R}\right)=\frac{FT}{R}\left(y_{i-1}-\frac{1}{2}\frac{FT}{R}x_{i-1}\right) \tag{3-30}$$

在相似直角 ΔOQB 与直角 $\Delta A_{i-1}MA_i'$ 中，有下述关系

$$\frac{\overline{A_{i-1}M}}{\overline{A_{i-1}A_i'}}=\frac{\overline{QB}}{\overline{OB}}=\frac{\overline{QQ'}+\overline{Q'B}}{\overline{OB}}$$

由前面已知 $\overline{A_{i-1}A_i'}=\Delta L=FT$，$\overline{OB}=\sqrt{\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2+R^2}$，则在直角 $\Delta A_{i-1}Q'B$ 中

$$\overline{Q'B}=\overline{A_{i-1}B}\cos\alpha=\frac{1}{2}\Delta L\frac{y_{i-1}}{R}$$

又有 $\overline{QQ'}=x_{i-1}$，因此有

$$\Delta y_i=\overline{A_{i-1}M}=\frac{\overline{A_{i-1}A_i'}(\overline{QQ'}+\overline{Q'B})}{\overline{OB}}=\frac{\Delta L\left(x_{i-1}+\frac{1}{2}\Delta L\frac{y_{i-1}}{R}\right)}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2+R^2}} \tag{3-31}$$

同理，$\Delta L\ll R$，故可将 $\left(\frac{1}{2}\Delta L\right)^2$ 略去，则式（3-31）变为

$$\Delta y_i \approx \frac{\Delta L}{R}\left(x_{i-1}+\frac{1}{2}\frac{\Delta L}{R}y_{i-1}\right)=\frac{FT}{R}\left(x_{i-1}+\frac{1}{2}\frac{FT}{R}y_{i-1}\right) \tag{3-32}$$

将 $K=\frac{FT}{R}$ 代入式（3-30）和式（3-32），则

$$\begin{cases}\Delta x_i = K\left(y_{i-1}-\frac{1}{2}Kx_{i-1}\right)\\ \Delta y_i = K\left(x_{i-1}+\frac{1}{2}Ky_{i-1}\right)\end{cases} \tag{3-33}$$

则 A_i' 点的坐标值为

$$\begin{cases}x_i = x_{i-1}+\Delta x_i\\ y_i = y_{i-1}-\Delta y_i\end{cases} \tag{3-34}$$

式（3-33）和式（3-34）为第一象限顺时针方向圆弧插补计算公式，依照此原理，可得出其他象限及其旋转方向的扩展 DDA 圆弧插补计算公式。

由上述扩展 DDA 圆弧插补公式可知，采用该方法只需要进行加法、减法及有限次乘法运算，因而计算比较方便、速度较高。此外，该法用割线逼近圆弧，其精度较弦线法高，因此扩展 DDA 法是比较合适于 CNC 系统的一种插补算法。

3.4.4 刀具补偿功能

1. 刀具补偿的基本原理

在轮廓加工中，由于刀具总有一定的半径（如铣刀半径或线切割机的钼丝半径），刀具中心的运动轨迹并不等于所要加工零件的实际轮廓。也就是说，数控机床进行轮廓加工时，必须考虑刀具半径。如图 3-32 所示，在进行外轮廓加工时，刀具中心需要偏移零件的外轮廓面一个半径值。这种偏移习惯上称为刀具半径补偿。

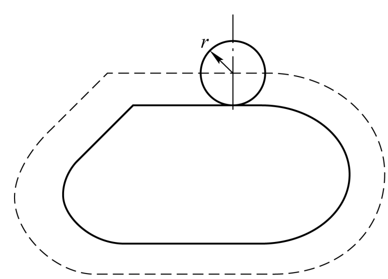


图 3-32　刀具中心的偏移

加工中心和数控车床在换刀后还需考虑刀具长度补偿，因此刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿两部分计算。刀具长度的补偿计算较简单，本节着重讨论刀具半径补偿。

在零件轮廓加工过程中，刀具半径补偿的执行过程分为以下三步：

（1）刀具补偿建立　指刀具从起点出发沿直线接近加工零件，刀具中心在原来的编程轨迹的基础上偏移一个刀具半径值，即刀具中心从与编程轨迹重合过渡到与编程轨迹偏离一个刀具半径值，如图 3-33 所示。

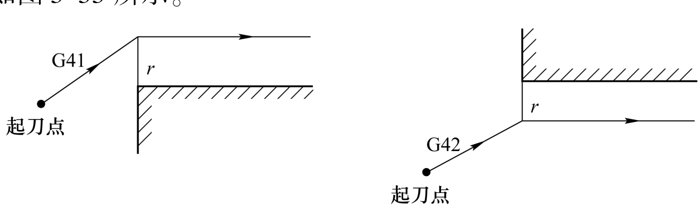


图 3-33　建立刀具补偿

（2）刀具补偿进行　刀具补偿指令是模态指令，一旦刀具补偿建立后一直有效，直至刀具补偿撤销。在刀具补偿进行期间，刀具中心轨迹始终偏离编程轨迹一个刀具半径值的距

离。在轨迹转接处，采用圆弧过渡或直线过渡。

（3）刀具补偿撤销　指刀具撤离工件，回到起刀点。与刀具补偿建立时相似，刀具中心轨迹从与编程轨迹相距一个刀具半径值过渡到与编程轨迹重合。

2. 刀具半径补偿计算

刀具半径补偿计算就是要根据零件尺寸和刀具半径计算出刀具中心的运动轨迹。对于一般的 CNC 系统，其所能实现的轮廓控制仅限于直线和圆弧。对直线而言，刀具半径补偿后的刀具中心运动轨迹是一条与原直线相平行的直线，因此直线轨迹的刀具半径补偿计算只需计算出刀具中心轨迹的起点和终点坐标。对于圆弧而言，刀具半径补偿后的刀具中心运动轨迹是一与原圆弧同心的圆弧。因此圆弧的刀具半径补偿计算只需计算出刀具补偿后圆弧起点和终点的坐标值以及刀具补偿后的圆弧半径值。有了这些数据，轨迹控制（直线或圆弧插补）就能够实施。

3. C 功能刀具半径补偿计算

（1）C 功能刀具半径补偿的基本概念　极坐标法、r^2法、矢量判断法等一般刀具半径补偿方法（也称 B 刀具补偿），只能计算出直线或圆弧终点的刀具中心值，而对于两个程序段之间在刀具补偿后可能出现的一些特殊情况没有给予考虑。

实际上，当程序编制人员按零件的轮廓编制程序时，各程序段之间是连续过渡的，没有间断点，也没有重合段。但是，当进行了刀具半径补偿（B 刀具补偿）后，在两个程序段之间的刀具中心轨迹就可能会出现间断点和交叉点。如图 3-34 所示，粗线为编程轮廓，当加工外轮廓时，会出现间断 $A' \sim B'$；当加工内轮廓时，会出现交叉点 C''。

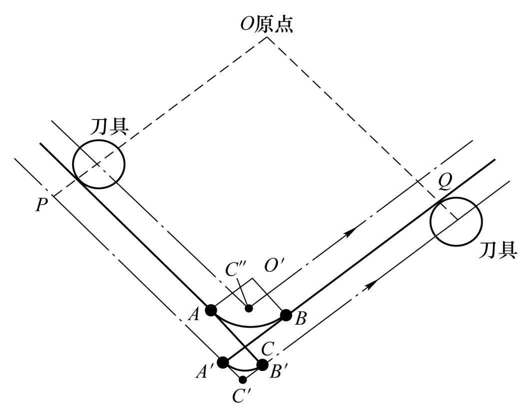


图 3-34　B 刀具补偿的交叉点和间断点

对于只有 B 刀具补偿的 CNC 系统，编程人员必须事先估计出在进行刀具补偿后可能出现的间断点和交叉点的情况，并进行人为的处理。如遇到间断点时，可以在两个间断点之间增加一个半径为刀具半径的过渡圆弧段$\overset{\frown}{A'B'}$。遇到交叉点时，事先在两个程序段之间增加一个过渡圆弧段$\overset{\frown}{AB}$，圆弧的半径必须大于所使用的刀具的半径。显然，这种仅有 B 刀具补偿功能的 CNC 系统对编程人员是很不方便的。

但是，最早也是最容易为人们所想到的刀具半径补偿方法，就是由数控系统根据和实际轮廓完全一样的编程轨迹，直接算出刀具中心轨迹的转接交点 C'和 C''，然后再对原来的程序轨迹作修正。

以前，C'和 C''点不易求得，主要是由于数控装置的运算速度和硬件结构的限制。随着 CNC 技术的发展，系统工作方式、运算速度及存储容量都有了很大的改进和增加，采用直线或圆弧过渡，直接求出刀具中心轨迹交点的刀具半径补偿方法已经能够实现了，这种方法被称为 C 功能刀具半径补偿，简称 C 刀具补偿。

（2）C 刀具补偿的基本设计思想　B 刀具补偿对编程限制的主要原因是在确定刀具中心

轨迹时，都采用了读一段、算一段、再走一段的控制方法。这样，就无法预计到由于刀具半径所造成的下一段加工轨迹对本段加工轨迹的影响。于是，对于给定的加工轮廓轨迹来说，当加工内轮廓时，为了避免刀具干涉，合理地选择刀具的半径以及在相邻加工轨迹转接处选用恰当的过渡圆弧等问题，就不得不靠程序员自己来处理。

为了解决下一段加工轨迹对本段加工轨迹的影响，需要在计算完本段轨迹后，提前将下一段程序读入，然后根据它们之间转接的具体情况，再对本段的轨迹作适当的修正，得到正确的本段加工轨迹。

如图 3-35a 所示是普通数控系统的工作方法，程序轨迹作为输入数据送到工作寄存器 AS 后，由运算器进行刀具补偿运算，运算结果送输出寄存器 OS，直接作为伺服系统的控制信号。图 3-35b 是改进后的数控系统的工作方法。与图 3-35a 相比，增加了一组数据输入的缓冲器 BS，节省了数据读入时间。往往是 AS 中存放着正在加工的程序段信息，而 BS 中已经存放了下一段所要加工的信息。图 3-35c 是在 CNC 系统中采用 C 刀具补偿方法的原理框图。与以前方法不同的是，CNC 装置内部又设置了一个刀具补偿缓冲区 CS。零件程序的输入参数在 BS、CS、AS 中的存放格式是完全一样的。当某一程序在 BS、CS 和 AS 中被传送时，它的具体参数是不变的，这主要是为了输出显示的需要。实际上，BS、CS 和 AS 各自包括一个计算区域，编程轨迹的计算及刀具补偿修正计算都是在这些计算区域中进行的。当固定不变的程序输入参数在 BS、CS 和 AS 间传送时，对应的计算区域的内容也就跟着一起传送。因此，也可以认为这些计算区域对应的是 BS、CS 和 AS 区域的一部分。

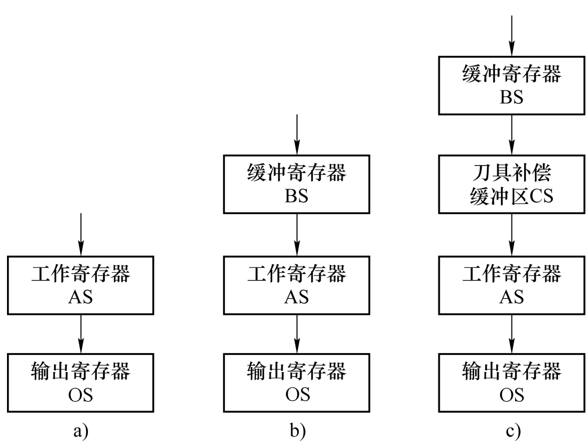


图 3-35　几种数控系统的工作流程

a）数控工作方法　b）改进的数控工作方法　c）CNC 工作方法

这样，在系统起动后，第一段程序先被读入 BS，在 BS 中算得的第一段编程轨迹被送到 CS 暂存后，又将第二段程序读入 BS，算出第二段的编程轨迹。接着，对第一、第二两段编程轨迹的连接方式进行判别，根据判别结果，再对 CS 中的第一段编程轨迹作相应的修正。修正结束后，顺序地将修正后的第一段编程轨迹由 CS 送到 AS，第二段编程轨迹由 BS 送入 CS。随后，由 CPU 将 AS 中的内容送到 OS 进行插补运算，运算结果送伺服驱动装置予以执行。当修正了的第一段编程轨迹开始被执行后，利用插补间隙，CPU 又命令第三段程序读入 BS，随后，又根据 BS、CS 中的第二段、第三段编程轨迹的连接方式，对 CS 中的第二段编程轨迹进行修正。依此进行，可见在刀具补偿工作状态，CNC 装置内部总是同时存有三

个程序段的信息。

在具体实现时，为了便于交点的计算以及对各种编程情况进行综合分析，从中找出规律，必须将 C 刀具补偿方法所有的编程输入轨迹都当作矢量来看待。

显然，直线段本身就是一个矢量。而圆弧在这里意味着要将起点、终点的半径及起点到终点的弦长都看作矢量，零件刀具半径也作为矢量看待。所谓刀具半径矢量，是指在加工过程中，始终垂直于编程轨迹，大小等于刀具半径值，方向指向刀具中心的一个矢量。在直线加工时，刀具半径矢量始终垂直于刀具移动方向。在圆弧加工时，刀具半径矢量始终垂直于编程圆弧的瞬时切点的切线，它的方向是一直在改变的。

（3）刀具长度补偿的计算　所谓刀具长度补偿，就是把工件轮廓按刀具长度在坐标轴（车床为 X、Z 轴）上的补偿分量平移。对于每一把刀具来说，其长度是一定的，它们在某种刀具夹座上的安装位置也是一定的。因此在加工前可预先测得装在刀架上的刀具长度在 X 和 Z 方向的分量，即 Δx 刀偏和 Δz 刀偏。通过数控装置的手动数据输入工作方式将 Δx 和 Δz 输入到 CNC 装置，从 CNC 装置的刀具补偿表中调出刀偏值进行计算。数控车床需对 X 轴、Z 轴进行刀具长度补偿计算，数控铣床只需对 Z 轴进行刀具长度补偿计算。

3.4.5　进给速度与加减速控制

在高速运动阶段，为了保证机床在起动或停止时不产生冲击、失步、超程或振荡，数控系统需要对机床的进给速度进行加减速控制。在加工过程中，为了保证加工质量，在进给速度发生突变时必须对送到进给电动机的脉冲频率或电压进行加减速控制。在起动或速度突然升高时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐增大；当速度突然降低时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐减小。

1. 进给速度控制

脉冲增量插补和数据采样插补由于计算方法不同，其进给速度控制方法也有所不同。

（1）脉冲增量插补算法的进给速度控制　脉冲增量插补的输出形式是脉冲，其频率与进给速度成正比。因此可通过控制插补运算的频率来控制进给速度。常用的方法有：软件延时法和中断控制法。

1）软件延时法。根据编程进给速度，可以求出要求的进给脉冲频率，从而得到两次插补运算之间的时间间隔 t，它必须大于 CPU 执行插补程序的时间 $t_{程}$，t 与 $t_{程}$之差即为应调节的时间 $t_{延}$，可以编写一个延时子程序来改变进给速度。

【例 3.5】　设某数控装置的脉冲当量 $\delta = 0.01\text{mm}$，插补程序运行时间 $t_{程} = 0.1\text{ms}$，若编程进给速度 $v = 300\text{mm/min}$，求调节时间 $t_{延}$。

解：由 $v = 60\delta f$ 得

$$f = \frac{v}{60\delta} = \left(\frac{300}{60 \times 0.01}\right)\text{Hz} = 500\text{Hz}$$

则插补时间间隔

$$t = \frac{1}{f} = 0.002\text{s} = 2\text{ms}$$

调节时间

$$t_{延} = t - t_{程} = (2 - 0.1)\text{ms} = 1.9\text{ms}$$

用软件编程实现上述延时，即可达到进给速度控制的目的。

2）中断控制法。由进给速度计算出定时器/计数器（CTC）的定时时间常数，以控制

CPU 中断。定时器每申请一次中断，CPU 执行一次中断服务程序，并在中断服务程序中完成一次插补运算并发出进给脉冲。如此连续进行，直至插补完毕。

这种方法使得 CPU 可以在两个进给脉冲时间间隔内做其他工作，如输入、译码、显示等。进给脉冲频率由定时器时间常数决定。时间常数的大小决定了插补运算的频率，也决定了进给脉冲的输出频率。该方法速度控制比较精确，控制速度不会因为计算机主频的不同而改变，所以在数控系统中被广泛应用。

（2）数据采样插补算法的进给速度控制　数据采样插补根据编程进给速度计算出一个插补周期内合成速度方向上的进给量。

$$f_s = \frac{FTK}{60 \times 1000} \tag{3-35}$$

式中，f_s为系统在稳定进给状态下的插补进给量，称为稳定速度（mm/min）；F 为编程进给速度（mm/min）；T 为插补周期（ms）；K 为速度系数，包括快速倍率、切削进给倍率等。

为了调速方便，设置了速度系数 K 来反映速度倍率的调节范围，通常 K 取 0%～200%，当中断服务程序扫描到面板上倍率开关的状态时，给 K 设置相应参数，从而对数控装置面板手动速度调节作出正确响应。

2. 加减速控制

在 CNC 装置中，加减速控制多数都采用软件来实现，这给系统带来了较大的灵活性。这种用软件实现的加减速控制可以放在插补前进行，也可以放在插补后进行，放在插补前的加减速控制称为前加减速控制，放在插补后的加减速控制称为后加减速控制。

前加减速控制，仅对编程进给速度 F 指令进行控制，其优点是不会影响实际插补输出的位置精度，其缺点是需要预测减速点，而这个减速点要根据实际刀具位置与程序段终点之间的距离来确定，预测工作需要完成的计算量较大。

后加减速控制与前加减速相反，它是对各运动轴分别进行加减速控制，这种加减速控制不需要专门预测减速点，而是在插补输出为零时才开始减速，经过一定的延时逐渐靠近程序段终点。该方法的缺点是，由于它是对各运动轴分别进行控制，所以在加减速控制以后，实际的各坐标轴的合成位置就可能不准确。但这种影响仅在加减速过程中才会有，当系统进入匀速状态时，这种影响就不存在了。

（1）前加减速控制

1）稳定速度和瞬时速度。所谓稳定速度，就是系统处于稳定进给状态时，一个插补周期内的进给量 f_s，可用式（3-35）表示。通过该计算公式将编程速度指令或快速进给速度 F 转换成每个插补周期的进给量，并包括了速率倍率调整的因素在内。如果计算出的稳定速度超过系统允许的最大速度（由参数设定），取最大速度为稳定速度。

所谓瞬时速度，指系统在每个插补周期内的进给量。当系统处于稳定进给状态时，瞬时速度 f_i 等于稳定速度 f_s，当系统处于加速（或减速）状态时，$f_i < f_s$（或 $f_i > f_s$）。

2）线性加减速处理。当机床起动、停止或在切削加工过程中改变进给速度时，数控系统自动进行线性加、减速处理。加、减速速率分为进给和切削进给两种，它们必须作为机床的参数预先设置好。设进给速度为 F(mm/min)，加速到 F 所需的时间为 t(ms)，则加速度 a 按式（3-36）计算，即

$$a = \frac{1}{60 \times 1000} \times \frac{F}{t} = 1.67 \times 10^{-5} \frac{F}{t} \tag{3-36}$$

① 加速处理。系统每插补一次，都应进行稳定速度、瞬时速度的计算和加减速处理。当计算出的稳定速度 f'_s 大于原来的稳定速度 f_s 时，需进行加速处理。每加速一次，瞬时速度为

$$f_{i+1} = f_i + aT \tag{3-37}$$

式中，T 为插补周期。

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，对各坐标轴进行分配，使坐标轴运动直至新的稳定速度为止。

② 减速处理。每进行一次插补计算，系统都要进行终点判别，计算出刀具距终点的瞬时距离 s_i，并判别是否已到达减速区域 s。若 $s_i \leqslant s$，表示已到达减速点，则要开始减速。在稳定速度 f_s 和设定的加速度 a 确定后，可由式（3-38）决定减速区域，即

$$s = \frac{f_s^2}{2a} + \Delta s \tag{3-38}$$

式中，Δs 为提前量，可作为参数预先设置好。若不需要提前一段距离开始减速，则可取 $\Delta s = 0$，每减速一次后，新的瞬时速度为

$$f_{i+1} = f_i - aT \tag{3-39}$$

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，控制各坐标轴移动，直至减速到新的稳定速度或减速到零。

3）终点判别处理。每进行一次插补计算，系统都要计算 s_i，然后进行终点判别。若即将到达终点，就设置相应标志；若本程序段要减速，则要在到达减速区域时设置减速标志，并开始减速处理。终点判别计算分为直线和圆弧插补两个方面。

① 直线插补。如图 3-36 所示，设刀具沿直线 OE 运动，E 为直线程序段终点，N 为某一瞬时点。在插补计算时，已计算出 x 轴和 y 轴插补进给量 Δx 和 Δy，所以 N 点的瞬时坐标可由上一插补点的坐标 x_{i-1} 和 y_{i-1} 求得

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + \Delta x \\ y_i = y_{i-1} + \Delta y \end{cases} \tag{3-40}$$

瞬时点离终点 E 的距离 s_i 为

$$s_i = NE = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \tag{3-41}$$

② 圆弧插补。如图 3-37 所示，设刀具沿圆弧 AE 作顺时针运动，N 为某一瞬时插补点，其坐标值 x_i 和 y_i 已在插补计算中求出。N 离开终点 E 的距离 s_i 为

$$s_i = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \tag{3-42}$$

终点判别的原理框图如图 3-38 所示。

（2）后加减速控制　后加减速控制主要有指数加减速控制算法和直线加减速控制算法。在切削进给或手动进给时，跟踪响应要求较高，一般采用指数加减速控制，将速度突变处理成速度随时间指数规律上升或下降，如图 3-39 所示。

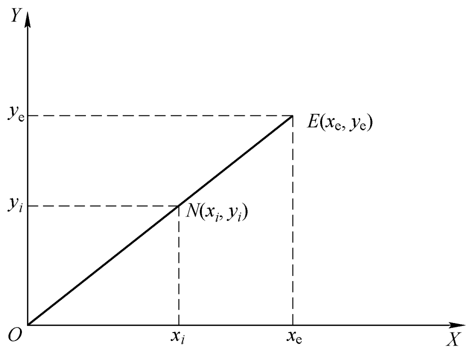


图 3-36　直线插补终点判别

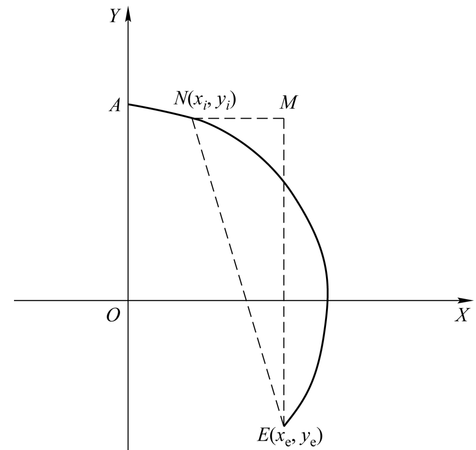


图 3-37　圆弧插补终点判别

1）指数加减速控制算法。指数加减速控制时速度与时间的关系如下：

加速时为　$v(t) = v_c(1 - e^{-\frac{t}{T}})$　（3-43）

匀速时为　$v(t) = v_c$　（3-44）

减速时为　$v(t) = v_c e^{-\frac{t}{T}}$　（3-45）

式中，T 为时间常数；v_c为稳定速度。

上述过程可以用累加公式来实现，即

$$E_i = \sum_{k=0}^{i-1}(v_c - v_k)\Delta t \tag{3-46}$$

$$v_i = E_i \frac{1}{T} \tag{3-47}$$

下面结合指数加减速控制算法的原理图 3-40 来说明公式的含义。Δt 为采样周期，它在算法中的作用是对加减速运算进行控制，即每个采样周期进行一次加减速运算。误差寄存器 E 的作用是对每个采样周期的输入速度 v_c与输出速度 v 之差 $E = v_c - v$ 进行累加。累加的结果，一方面保存在误差寄存器 E 中，另一方面与 $1/T$ 相乘，乘积作为当前采样周期加减速控制的输出 v。同时 v 又反馈到输入端，准备在下一个采样周期中重复以上过程。公式中的 E_i 和 v_i 分别为第 i 个采样周期误差寄存器 E 中的值和输出速度值，迭代初值分别为 $E_0 = 0$ 和 v_0。

当 Δt 足够小时，式（3-46）和式（3-47）可写成

$$E(t) = \int_0^t [v_c - v(t)]\mathrm{d}t \tag{3-48}$$

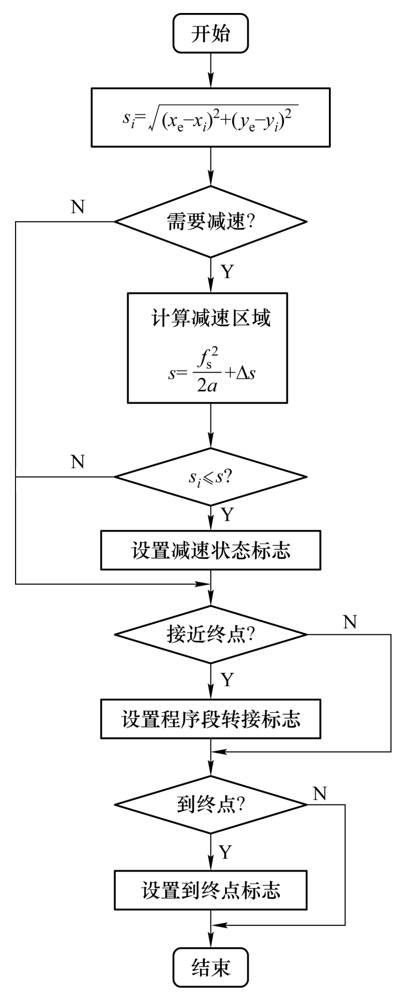


图 3-38　终点判别的原理框图

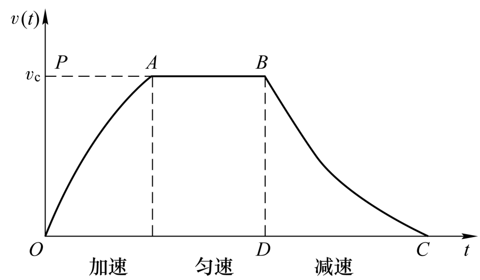


图 3-39　指数加减速控制

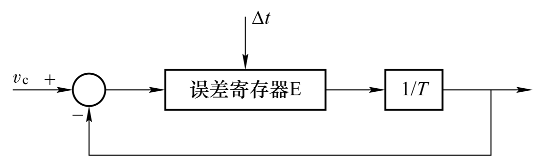


图 3-40　指数加减速控制算法的原理图

$$v(t)=\frac{1}{T}E(t) \tag{3-49}$$

对式（3-48）和式（3-49）分别求导得

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t}=v_c-v(t) \tag{3-50}$$

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{T}\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3-51}$$

将式（3-50）和式（3-51）合并得

$$T\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}=v_c-v(t)$$

或

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{v_c-v(t)}=\frac{\mathrm{d}t}{T} \tag{3-52}$$

式（3-52）两端积分后得

$$\frac{v_c-v(t)}{v_c-v(0)}=\mathrm{e}^{-\frac{1}{T}} \tag{3-53}$$

加速时 $v(0)=0$，故　$$v(t)=v_c(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}) \tag{3-54}$$

匀速时 $t\to\infty$，故　$$v(t)=v_c \tag{3-55}$$

减速时 $v(0)=0$，且输入为零，由式（3-50）得

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t}=v_c-v(t)=-v(t) \tag{3-56}$$

代入式（3-51）得

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{v(t)}{T} \tag{3-57}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{v(t)}=-\frac{\mathrm{d}t}{T} \tag{3-58}$$

两端积分后　$$v(t)=v_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}=v_c\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}} \tag{3-59}$$

上面的推导过程证明了用式（3-46）和式（3-47）可以实现指数加减速控制。下面进一步导出其实用的指数加减速算法公式。

参照式（3-46）和式（3-47），令

$$\Delta s_i = v_i \Delta t$$
$$\Delta s_c = v_c \Delta t$$

则 Δs_c为每个采样周期加减速的输入位置增量，即每个插补周期内粗插补计算出的坐标位置增量值。s_i为第 i 个插补周期加减速输出的位置增量值。

将以上两式代入式（3-46）和式（3-47）得

$$E_i = \sum_{k=0}^{i-1}(\Delta s_c - \Delta s_i) = E_{i-1} + (\Delta s_c - \Delta s_{i-1}) \tag{3-60}$$

$$\Delta s_i = E_i \frac{1}{T} \quad （取 \Delta t = 1） \tag{3-61}$$

以上两组公式就是数字增量式指数加减速实用迭代公式。

2）直线加减速控制算法。快速进给时速度变化范围大，要求平稳性好，一般采用直线加减速控制，速度突然升高时，沿一定斜率的直线上升，速度突然降低时，沿一定斜率的直线下降，如图 3-41 所示的速度变化曲线 $OABC$。

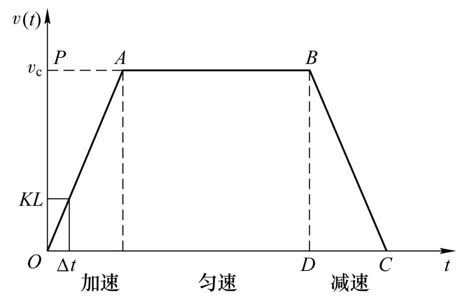


图 3-41　直线加减速控制

直线加减速控制分以下五个过程：

① 加速过程。若输入速度 v_c与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1}之差大于一个常值 KL，即 $v_c - v_{i-1} > KL$，则必须进行加速控制，使本次采样周期的输出速度增加 KL，即

$$v_i = v_{i-1} + KL \tag{3-62}$$

式中，KL 为加减速的速度阶跃因子。显然在加速过程中，输出速度 v_i沿斜率为 $K' = \frac{KL}{\Delta t}$的直线上升。这里 Δt 为采样周期。

② 加速过渡过程。当输入速度 v_c与上次采样周期的输出速度 v_{i-1}之差满足

$$0 < v_c - v_{i-1} < KL \tag{3-63}$$

时说明速度已上升至接近匀速。这时可改变本次采样周期的输出速度 v_i，使之与输入速度相等，即

$$v_i = v_c \tag{3-64}$$

经过这个过程后，系统进入稳定速度状态。

③ 匀速过程。在这个过程中，输出速度保持不变，即

$$v_i = v_{i-1} \tag{3-65}$$

④ 减速过渡过程。当输入速度 v_c与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1}之差满足

$$0 < v_{i-1} - v_c < KL \tag{3-66}$$

时说明应开始减速处理。改变本次采样周期的输出速度 v_i，使之减小到与输入速度 v_c相等，即

$$v_i = v_c \tag{3-67}$$

⑤ 减速过程。若输入速度 v_c小于一个采样周期的输出速度 v_{i-1}，但其差值大于 KL 值时，即

$$v_{i-1} - v_c > KL \tag{3-68}$$

则要进行减速控制，使本次采样周期的输出速度 v_i减小一个 KL 值，即

$$v_i = v_{i-1} - KL \tag{3-69}$$

显然在减速过程中，输出速度沿斜率为 $K' = -\frac{KL}{\Delta t}$的直线下降。

后加减速控制的关键是加速过程和减速过程的对称性，即在加速过程中输入到加减速控制器的总进给量必须等于该加减速控制器减速过程中实际输出的进给量之和，以保证系统不产生失步和超程。因此，对于指数加减速和直线加减速，必须使图 3-39 和图 3-41 中区域 OPA 的面积等于区域 DBC 的面积。为此，用位置误差累加寄存器 E 来记录由于加速延时而失去的进给量之和。当发现剩下的总进给量小于寄存器 E 中的值时，即开始减速，在减速过程中，又将误差寄存器 E 中保存的值按一定规律（指数或直线）逐渐放出，以保证在加减速过程结束时，机床到达指定的位置。由此可见，后加减速控制不需要预测减速点，而是通过误差寄存器的进给量来保证加减速过程的对称性，使加减速过程图中的两块三角形面积相等。

【知识拓展】

近年来，CNC 系统在功能修改，扩充和适应性方面呈现较大的灵活性和通用性。新型的开放式数控系统以软件为基础，使用标准化模块组件，用户可以根据需要，随时局部更新或升级，具有较好的经济性、实时性。其基本设计理念是：以现代管理和现代制造理论为指导；以 Windows、Linux 为开发和运行平台，以通用编程软件为开发工具；系统以相对独立模块为组件，可裁减，易升级；部件设计标准化等。其特征为：

1）系统的设计以现代管理和现代制造为引导，基于软件，全局规划。整个系统软件以模块组件形式整合为一体，模块与模块间以接口形式应用程序控制总线交换数据。

2）系统运行于 Windows、Linux 上，工作在多进程、多线程状态下，即可同时运行多个应用软件。

3）系统软件具有通用特征，即具有抽象性，本身并不实例化，适用现有各类型数控机床（如加工中心、数控车床、线切割机床等）。具体应用时，在系统软件的机床配置模块中进行配置，生成具体机床实例。

4）以 USB2.0、IEEE1394 为通信接口，连接数控系统和机床。

5）CAD/CAM/CNC/CAPP 等功能为一体，系统具备完成产品设计、工艺分析、产品加工以及生产管理等功能的能力。各功能模块相对独立，可以单独升级和裁剪。

6）数据的细化、插补运算等处理工作由软件完成。

7）网络功能（FMS/CIM 功能，远程通信功能等）是网络加工和无人工厂的基础，是现代工厂的发展方向。

8）机床具有独立完整的嵌入式系统，其软件系统是由数控系统生成，并可以随时无限制地升级或改变。

9）机床的每一个部件在结构、功能上应相对独立，即模块化、标准化设计，只需要在系统中配置后，就可以使用。这样就不会因机床某一部件的改变，而对机床作出大的调整。

【本章小结】

本章主要讲述了数控系统的组成及工作原理，CNC 系统的软、硬件结构和控制方法。重点介绍了插补的基本概念、基本理论和基本计算方法。其中重点内容是 CNC 系统的软、硬件结构和插补的基本理论。

1）CNC 系统主要由程序、I/O 设备、计算机数控装置、可编程控制单元，主轴控制单元和速度控制单元等部分组成。主要工作内容有输入、译码、刀具补偿、进给速度处理、插补、位置控制、I/O 处理、显示、诊断等。CNC 系统硬件结构主要有单 CPU 和多 CPU 两种。CNC 系统软件包括管理软件和控制软件。管理软件中有输入、I/O 处理、显示、诊断等软件；控制软件包括译码、刀具补偿、速度控制、插补、位置控制等软件。

2）通过实例对常用的几种插补算法，如逐点比较法、数字积分法及内接弦法的直线插补和圆弧插补进行了较详细阐述，并且还简要介绍了一些其他插补算法。

逐点比较法是常用的插补方法。它具有精度较高，速度平稳等特点，可实现直线和圆弧的插补。逐点比较法插补既可以用硬件实现，也可以用软件来完成。数字积分法是一种在轮廓控制系统中广泛应用的插补方法。其主要特点是容易实现多轴联动，可进行空间直线和曲面的插补等。至于插补质量，可以采用进给速度均匀化与溢出脉冲均匀化等措施来改善。

数据采样法又称“时间分割法”，是一种典型的二级插补方法，即粗插补与精插补结合。粗插补，其实质是使用一系列首尾相接的微小直线段逼近给定轮廓，基本计算过程分为插补准备与插补计算两步。精插补则是在粗插补提供的微小直线段的基础上，进一步实施插补点的密化。

3）系统采用的插补算法不同，进给速度的控制方式也随之不同。采用基准脉冲插补法的数控系统通过插补运算的频率来实现进给速度调节，常用的两种方法是程序计时法和时钟中断法。采用数据采样法的数控系统可以采用前加减速控制或者后加减速控制的方式进行速度控制。

思考题与习题

3-1　CNC 系统主要由哪几部分组成？其核心是什么？

3-2　CNC 装置的主要功能有哪些？

3-3　单 CPU 结构和多 CPU 结构各有何特点？

3-4　比较共享总线型结构 CNC 装置和共享存储结构 CNC 装置的工作特点及优缺点？

3-5　CNC 装置软件结构有何特点？

3-6　CNC 装置软件采用的并行处理方法有哪几种？这些方法是如何实现并行处理的？

3-7　CNC 装置的中断类型和中断结构模式有哪些？各有何特点？

3-8　何谓插补？有哪两类插补算法？

3-9　试述逐点比较法的四个节拍。

3-10　利用逐点比较法插补直线 OE，起点为 $O(0,\ 0)$，终点为 $E(6,\ 10)$，试写出插补

计算过程并绘出轨迹。

3-11　用所熟悉的计算机语言编写第一象限逐点比较法直线插补程序。

3-12　利用逐点比较法插补逆圆弧 AE，起点为 $P(4, 0)$，终点为 $Q(0, 4)$，试写出插补计算过程并绘出轨迹。

3-13　试推导出逐点比较法插补第一象限顺时针方向圆弧的偏差函数递推公式，并写出插补圆弧$\widehat{AB}$的计算过程，绘出其轨迹。设轨迹的起点为 $A(0, 6)$，终点为 $B(6, 0)$。

3-14　圆弧终点判别有哪些方法？

3-15　圆弧自动过象限如何实现？

3-16　逐点比较法如何实现 XY 平面所有象限的直线和圆弧插补？

3-17　试述 DDA 插补的原理。

3-18　设有一直线 OA，起点在坐标原点，终点 A 的坐标为（3，5），试用 DDA 法插补此直线。

3-19　设加工第一象限逆时针方向圆弧$\widehat{AE}$，起点 $A(7, 0)$，终点 $E(0, 7)$，寄存器位数为 4，试用 DDA 法插补。

3-20　数据采样插补是如何实现的？

3-21　何为刀具半径补偿？其执行过程如何？

3-22　B 刀具补偿与 C 刀具补偿有何区别？

3-23　设某一 CNC 系统的插补周期 $T=8$ms，进给速度 $F=300$mm/min，试计算插补步长 L。

3-24　圆弧插补的径向误差 $e \leqslant 1\mu$m，插补周期 $T=8$ms，插补圆弧半径为 100mm，问允许最大进给速度 v(mm/min）为多少？

3-25　脉冲增量插补的进给速度控制有哪些方法？

3-26　加减速控制有何作用？有哪些实现方法？

第 4 章　数控车削编程

【知识要点】

1. 数控车床分类。
2. 数控车床刀具系统。
3. 数控车削加工工艺。
4. 数控车床编程的特点。

4.1　数控车床概述

车床是主要用车刀对旋转的工件进行车削加工的机床。一般能够完成轴类及盘类零件的内、外轮廓以及螺纹的加工。数控车床是指用电子计算机或专用电子计算装置对数字化信息进行处理而实现自动控制的车床。

4.1.1　数控车床的分类

数控车床的分类方法很多，一般有以下分类方法：

1. 按主轴配置形式分类

（1）卧式数控车床　其主轴轴线采用水平布置，是目前使用最广泛的数控车床。卧式数控车床又分为水平导轨、倾斜导轨等形式，倾斜导轨结构可以使车床具有更大的刚性，并易于排除切屑。目前发展趋势是倾斜导轨。数控车床床身导轨与水平面的相对位置如图 4-1 所示。卧式数控车床如图 4-2 所示。

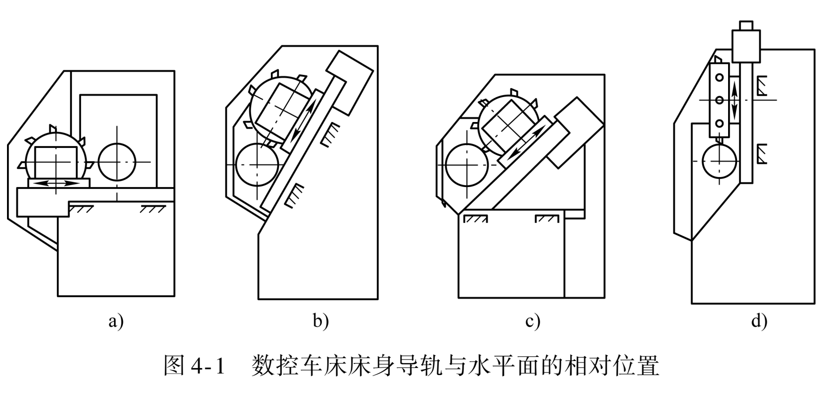


图 4-1　数控车床床身导轨与水平面的相对位置

（2）立式数控车床　其主轴轴线采用垂直布置，并且有一个直径较大的圆形工作台用来装夹工件（图 4-3）。一般用于加工径向尺寸较大而轴向尺寸较小的大型复杂零件。

2. 按数控系统技术水平分类

（1）经济型数控车床　早期的数控车床常采用步进电动机驱动的开环控制系统，一般是以普通车床的机械结构为基础，经过改进设计而成，甚至是对普通车床进行改造而成，其


图 4-2　卧式数控车床


图 4-3　立式数控车床

控制部分采用单片机实现（图 4-4）。现在的一些经济型数控车床也有采用较为简单的成品数控系统。其特点是结构简单、成本较低，但缺少一些诸如刀尖圆弧半径自动补偿和恒表面线速度切削等功能，自动化程度较低，车削精度稍差，一般只能进行两轴的控制和联动。

（2）全功能型数控车床　全功能型数控车床的控制系统一般带有高分辨率的 CRT，具有各种显示、图形仿真、刀具和位置补偿等功能，采用闭环或者半闭环系统，可以进行多个坐标轴的控制。

（3）车削中心　在全功能型数控车床的基础上，增加了 *C* 轴控制功能，再配合动力刀具的使用，在一次装夹后，可以实现车、铣、钻、铰、螺纹加工等多种工序的加工。其功能全面，加工质量和加工效率高，但成本也较高。


图 4-4　经济型数控车床



图 4-5　车削中心

（4）FMC 车床　FMC（Flexible Manufacturing Cell）车床是由数控车床、搬运（装卸）机器人等构成的柔性制造单元。它能实现加工、搬运、装卸的自动化和加工调整准备的自动化控制。

4.1.2　数控车床的组成和机械结构

1. 数控车床的组成

数控车床大致由以下四个部分组成。

（1）车床主体　一般是指数控车床的机械部分，主要包括床身、主轴箱、刀架、进给

传动机构等。

（2）数控系统　数控系统是数控车床的控制核心。其主要部分是一台计算机，这台计算机与一般计算机有共同之处，包括CPU（中央处理器）、存储器、显示器等部分。但也有不同之处，一般采用专用计算机，或者是工控机。数控系统的软件一般是专用数控系统软件。目前常用国外数控车床控制系统有：①日本发那科公司（FANUC）生产的0T、3T、5T、6T、10T、11T、0TC、0TE、0i等；②德国西门子公司（SIEMENS）生产的Sinumerik 802S、802C、802D、840D、840Di等；③此外还有日本三菱、德国海德汉（Heidenhain）、德国力士乐（Bosch Rexroth）、西班牙发格自动化（FAGOR AUTOMATION）等。

常用国内数控车床控制系统有：①广州数控生产的GSK980T、GSK988TD、GSK928TD等；②华中数控生产的HNC-8AT、HNC-210AT、HNC-21T、HNC-18iT、HNC-18XP-T等；③此外还有北京凯恩帝（KND）、中科院沈阳计算所蓝天系统等。

不同的数控系统在一些编程指令和操作上有一定的区别，本书主要以德国西门子公司的SINUMERIK 840D系统为准。

（3）伺服驱动系统　伺服驱动系统是数控车床进行切削工作的驱动部件，将数控系统输出的运动指令信息转换成机床移动部件的运动，主要包括主轴驱动、进给驱动以及位置控制等。在数控机床中，伺服驱动系统由伺服驱动电路和驱动装置两大部分组成。图4-6可以比较清楚地看到某数控车床的伺服驱动装置。

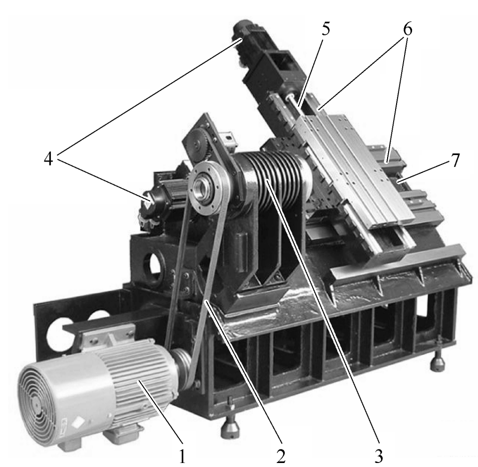


图4-6　数控车床伺服驱动装置
1—主轴电动机　2—带　3—主轴　4—进给电动机　5—丝杠　6—导轨　7—床身

（4）辅助装置　辅助装置是指诸如液压、气动、冷却、照明、润滑、防护和排屑等为加工服务的配套设施。

2. *数控车床的机械结构*

数控车床的机械结构与普通车床有相似之处，但作为数控车床，机械结构有了本质区别。数控车床的机械结构特点是：

1）采用高性能的主轴及主轴部件。具有运转速度快、传递功率大、刚度高、抗振性好、热变形小的特点。

2）进给系统采用高效传动件。具有传动链短、结构简单、响应速度快、传动精度高等特点。一般采用滚珠丝杠、直线滚动导轨等机构。

3）主运动和进给运动分离，各自有独立的驱动伺服电动机，使传动链缩短，传动路线简单、可靠，各电动机分别控制，也有利于实现多轴联动。

4）采用全封闭或者半封闭的防护装置。由于数控车床的高速运行，为了保证安全，防止切屑或切削液飞溅伤人，一般数控车床都有防护装置。有的数控车床还有自锁机构，要求主轴运行必须停止才能打开防护门。

5）采用液压卡盘、自动润滑以及自动排屑机构，这些辅助机构能够有效地降低操作人员的劳动强度，有效地提高生产效率。

6）数控车床都采用自动回转刀架，在加工过程中可以自动换刀，连续完成多道工序的

加工，提高了加工精度和加工效率。

4.2　数控车床刀具系统

4.2.1　数控车削类刀具的选择

数控车削刀具可以完成回转工件的内、外轮廓以及螺纹的加工。按照车刀所加工的表面特征来分有外圆车刀、端面车刀、内孔车刀（镗刀）、内（外）切刀、内（外）螺纹刀等，如图 4-7 所示。

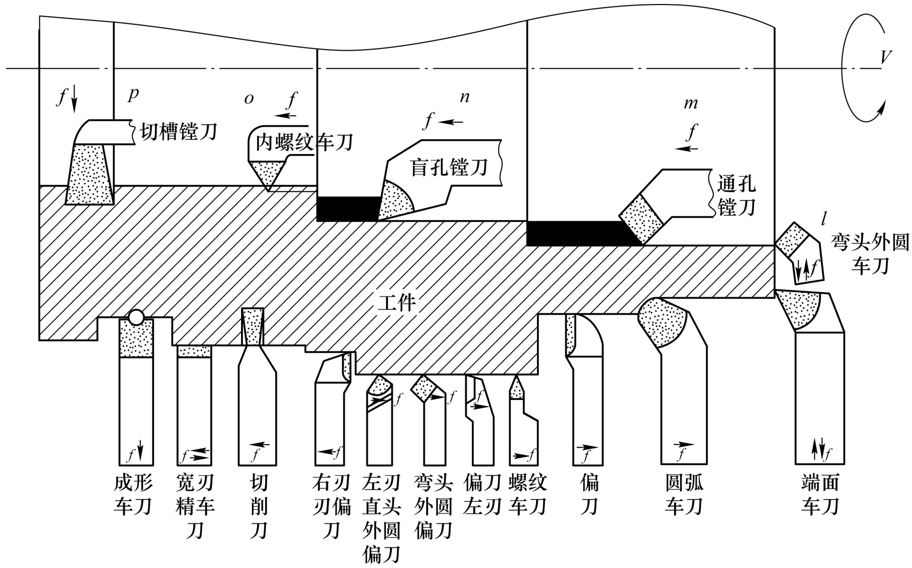


图 4-7　常用车刀的种类、形状和用途示意图

一般数控车床为保证加工效率和精度，常采用机夹可转位车刀，如图 4-8 所示。



图 4-8　机夹可转位车刀

1. 对数控车刀性能的要求

由于数控车床具有精度高、加工效率高、加工工序集中和零件装夹次数少的特点，因此对所使用的数控刀具提出了更高的要求。从性能上说，数控车刀高于普通机床所使用的刀具。

选用时，首先要优先考虑标准刀具，结合实际情况，尽可能选用先进刀具，目前数控车床常采用机夹可转位刀具，而刀片材料应尽量采用硬质合金、涂层硬质合金或陶瓷刀具等。

在选择数控车床刀具时，还应该考虑以下几方面的问题：

1）数控刀具的类型。规格和精度等级应该能够满足加工要求，刀具材料应与工件材料相适应。

2）切削性能好。为了适应刀具在粗加工或针对难加工材料的工件加工时，能采用大的背吃刀量和高进给量，刀具应具有能够承受高速切削和强力切削的性能。

3）精度高。为适应数控加工的高精度和自动换刀等要求，刀具必须具有较高的精度。

4）可靠性高。要保证数控加工中不会发生刀具意外损伤及潜在缺陷而影响加工的顺利进行，要求刀具及与之组合的附件必须具有良好的可靠性及较强的适应性。

5）耐用度高。数控加工的刀具，不论在粗加工或精加工中，都应具有比普通机床加工所用刀具更高的耐用度，尽量减少更换或修磨刀具的次数，从而提高数控机床的加工效率和保证加工质量。

6）断屑及排屑性能好。数控加工中，断屑和排屑不像普通机床加工那样能及时由人工处理，切屑易缠绕在刀具和工件上，会损坏刀具和划伤工件已加工表面，甚至会发生伤人和设备事故，影响加工质量和机床的安全运行，所以刀具应有良好的断屑及排屑性能。

2. 对刀具材料性能的要求

1）足够的硬度。刀具硬度必须比被加工材料高。一般要求常温硬度在60HRC以上，同时还要求刀具材料在一定温度一定时间下仍能保持其硬度。

2）足够的强度和韧性。在加工中，刀具还应能承受较大的切削力，而且抗冲击和抗振动的能力强。

3）良好的耐磨性。耐磨性决定了刀具的使用寿命，有利于提高零件尺寸的稳定性。

4）良好的工艺性和经济性。工艺性能优异有利于刀片的加工，降低生产成本。

目前最常见的刀具材料为硬质合金钢，硬质合金是由难熔金属碳化物（如WC、TiC、TaC等）和金属粘结剂（Co、Ni等）经过粉末冶金方法制成的。其特点是硬度高，可达74～82HRC；耐磨性和耐热性也好，它所允许的工作温度可达800～1000℃，甚至更高，所以允许的切削速度比高速钢高几倍到几十倍，可用于高速强力切削和难加工材料的切削加工。其缺点是抗弯强度较低，冲击韧性也较差，工艺性也不佳。因此，多用于制造简单的高速切削刀具。其常用的种类和牌号有：

1）普通硬质合金钢。按化学成分划分有钨钴类（YG）、钨钴钛类（YT）、钨钛钽类（YW）和碳化钛类硬质合金（YN）。常用牌号有YG3、YG6、YG8、YT5、YT15、YT30、YW1、YW2、YN10。其中钨钴类主要适用于加工脆性材料如铸铁和有色金属及非金属材料等，其中含钴越多，韧性越好，适用粗加工，相反则适宜精加工。钨钴钛类适用于高速切削塑性材料及钢材等，其中含碳化钛量少而含钴量多则适宜粗加工，相反则适宜精加工。钨钛钽类主要适用于加工难切削材料和连续表面。碳化钛类主要适用于合金钢、工具钢、淬硬钢等连续精加工。

2）钢结硬质合金。由TiC、WC作硬质相，以高速钢作粘结剂组成的一种新型刀具材料，其性能介于高速钢和常用硬质合金之间。钢结硬质合金烧结体经退火后可进行切削加

工，经淬火后具有常用硬质合金的高硬度（69～73HRC）和好的耐磨性，可进行锻造和焊接。可用于制造拉刀、铣刀、钻头等形状复杂、耐用度高的刀具。

3）超细晶粒硬质合金。碳化钨（WC）晶粒尺寸在 1μm 以下，Co 粘结剂可做到 0.2～0.4μm，所以硬度高，韧性好。可用来加工高温合金或高强度合金等难加工材料。

4）涂层硬质合金。在韧性好的硬质合金基体上，用气相沉积法等涂覆一层几微米厚且硬度高、耐磨性好的金属化合物（TiC、TiN、ZrC、陶瓷等）制成的材料，称为涂层硬质合金。用此材料制成的刀片（粒）适用于无冲击的半精加工和粗加工。

3. 刀杆材料的要求

1）一般车刀的刀杆采用 45 调质钢制造，具有足够的强度，又比较经济。

2）对于多数内孔用刀具，由于刀杆长径比较大，为保证强度，常采用合金钢材料制造。

3）高速切削和强力刀具，对刀杆强度和抗振性要求更高，常采用合金材料。

4. 机夹可转位车刀的选用

机夹可转位车刀是将可转位硬质合金刀具用机械的方法夹持在刀杆上形成的车刀，一般由刀片、刀垫、夹紧元件和刀体组成。按照夹紧机构的不同，可转位车刀可以分为压紧式（图 4-9）、偏心式、杠杆式、锲块式等。

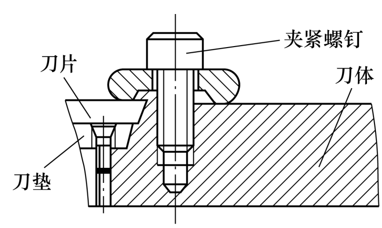


图 4-9　压紧式机夹可转位车刀

1）机夹可转位车刀刀片。可转位车刀刀片的形状有三角形、正方形、棱形、五边形、六边形和圆形等，由硬质合金压模成形，具有供切削时选用的几何参数（不需刃磨）。刀片具有 2 个以上供转位用的切削刃，当一个切削刃磨损后，松开夹紧机构，将刀片转位到另一切削刃，即可进行切削，当所有切削刃都磨损后可取下，换上新的同类型的刀片。

硬质合金可转位车刀刀片的国家标准中规定了产品型号表示方法、品种规格、尺寸系列、制造公差等。我国可转位车刀刀片的型号，共用 10 个号位的内容来表示主要参数的特征。具体规定如下：

第一号位表示刀片的形状，以一个字母表示；第二号位表示刀片的主切削刃后角，以一个字母表示；第三号位表示刀片的公差即尺寸精度，用一个字母表示；第四号位表示刀片固定方式及有无断屑槽形，用一个字母表示；第五号位表示刀片主切削刃长度，用两位数字表示；第六号位表示刀片的厚度，一般为两位数字表示（不足两位数以刀片厚度尺寸整数表示个位，前加一个 0）；第七号位表示刀尖的圆弧半径，一般用两位数字表示；第八号位表示刃口形状，用一个字母表示；第九号位表示刀片切削方向，用一个字母表示；第十号位表示卷屑槽形与宽度，一般为一个字母加一位数字表示。

2）机夹可转位车刀。机夹可转位车刀的国家标准规定具体型号用一组给定意义的字母和数字来表示。型号共有 10 个号位，前 9 个必须使用，第 10 号位仅用于符合标准的精密级车刀，各号位具体规定如下：

第一号位表示刀片的加紧方式，以一个字母表示；第二号位表示刀片的形状，以一个字母表示；第三号位表示刀具头形形式，用一个字母表示；第四号位表示刀片法向后角，用一个字母表示；第五号位表示刀具切削方向，用一个字母表示；第六号位表示刀尖高度，用两

位数字表示（刀尖高度不足两位数的，前加一个0）；第七号位表示刀具宽度，用两位数字表示（刀具宽度不足两位数的，前加一个0）；第八号位表示刀具长度，用一个字母表示；第九号位表示所用刀片尺寸数字，用两位数字表示（取刀片边长或者直径的整数部分）；第十号位表示精密级，一般为一个字母表示。

4.2.2 数控车床对刀

对刀是数控加工不可缺少的一个过程。数控车床上的刀具由于其刀具形状和尺寸的不同，每把刀具在使用时，刀尖点在工件坐标系中的位置是不同的。刀具补偿实质就是测量出每把刀具的刀尖位置差，将每把刀具的刀尖统一到同一坐标系（一般是工件坐标系）的某个位置，以便在编程中不用考虑刀具参数。一般情况下，在数控车床中需要测量的有两个数据，即长度 x 和长度 z，如图4-10所示。另外需要存储刀尖半径（即刀沿半径，这个数据一般由刀具生产厂家提供）和刀尖位置参数，如图4-11所示。

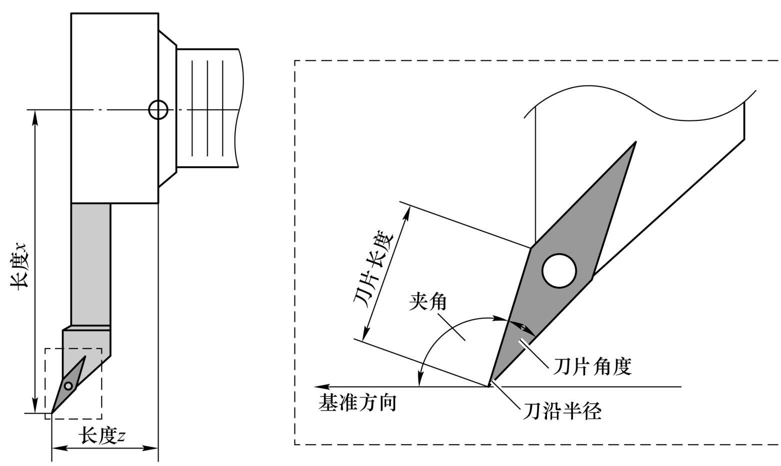


图4-10　车刀数据图

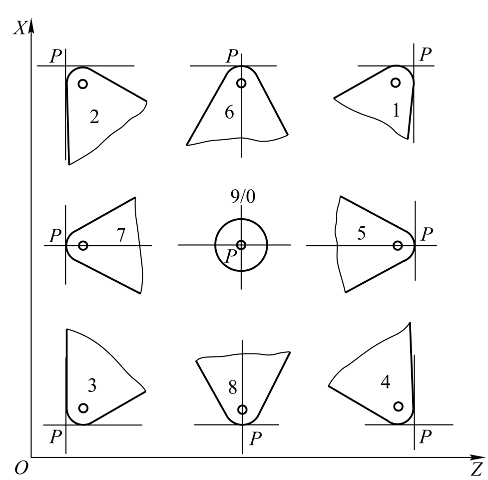


图4-11　车刀刀尖位置图

而长度 x 和长度 z 实际就是指刀尖到刀具基准点的位置差，一般在SIEMENS系统数控

车床上，刀具基准点是刀架上的一个固定点，所以在 SIEMENS 系统数控车床中所谓对刀就是测量刀尖点与刀具基准点在数控车床 X 轴与 Z 轴的距离，如图 4-10 所示。

对刀方法很多，不同类型的数控车床采用的对刀方式不同，这里介绍几种常用方法。

1. 试切法

试切法是数控车床普遍采用的一种简单而实用的对刀方法。其具体步骤如下：

1）用被测刀具刀尖将工件外圆试切一段，测量出工件试切部分的直径，从而计算出工件试切部分半径。根据机床屏幕上显示的刀具基准点的机床 x 坐标，可以计算刀具基准点到机床 Z 轴距离。计算刀具基准点到机床 Z 轴距离和工件试切部分半径的差值就是该刀具的长度 x。

2）用被测刀具刀尖将工件端面进行试切，机床刀具基准点 Z 轴坐标与工件端面试切部分的 Z 轴坐标之差就是该刀具的长度 z。

3）最后将所购买的刀具刀尖半径和车刀位置，输入到数控车床刀具数据存储界面。

2. 机内对刀

机内对刀一般是用刀具刀尖触及机床上的一个固定的触头，测得每把刀具刀尖的偏差值，并对每把刀具进行修正。

3. 机外对刀仪对刀

数控车床所用的对刀仪一般测量的是刀具之间的位置差。使用机外对刀仪的最大优点是：对刀过程不占用机床的时间，可以提高数控车床的使用率。缺点是：成本较高，其次是刀具必须连同刀座或者刀柄配套使用。

4.3　数控车削加工工艺

数控车床是在普通车床的基础上发展而来的，其加工工艺有相同之处，但是数控车床的加工过程是按预先编制出的数控加工程序，在数控系统的控制之下自动完成的。因此，数控车床相比普通车床，加工效率和加工精度更高，加工质量也更加稳定。

普通车床是由操作者操控车床一步一步实现的，数控车床的加工工艺是由所编制的数控加工程序实现的。所以合理的数控加工工艺对提高数控车床的加工效率和加工精度至关重要。

4.3.1　加工工艺的确定

1. 数控车削加工的主要对象

数控车削的主要对象包括以下零件：

1）精度要求高的回转体。数控车床能加工对母线直线度、圆度、圆柱度等形状精度要求高的回转体零件。对于圆弧或者其他曲线轮廓的加工，除了数控车床外，还可由操作人员直接操作普通车床加工，也可以采用仿形车床加工。但是加工精度、精度的稳定性以及加工的灵活性都不如数控车床。

2）表面粗糙度要求高的回转体零件。普通车床上加工直径变化较大的回转体零件时，由于只能采用恒定角速度加工，致使车削后的表面粗糙度并不一致。一般直径较大处粗糙度要好于直径较小处。而现在一些数控车床具有恒定线速度切削功能，主轴可以根据加工零件的直径自动改变主轴的角速度，加工出的零件表面粗糙度均匀，而且粗糙度数值较小。此外

数控车床主轴还可具有无级变速功能，数控车床可以根据不同的刀具、加工工艺、粗糙度要求在主轴不停转的情况下，自动改变主轴的转速和转向。

3）形状复杂难以加工的回转体零件。虽然普通车床、仿形车床也可以加工圆弧或者非圆轮廓，但是精度无法保证，而且当轮廓曲率较小时，加工难度更大，甚至无法加工。而数控车床具有圆弧插补功能，理论上可以车削出任意曲线的轮廓。另外内轮廓零件、变螺距螺纹，普通车床也很难加工，而数控车床可以完成。

2. 数控车削工艺路线的制定

数控车削是数控加工中用得最多的加工方法之一。数控车床上能完成内外回转体表面的车削、钻孔、镗孔、铰孔、切槽、车螺纹和攻螺纹等加工操作。制定零件的车削加工顺序一般遵循下列原则：先粗后精、先近后远、先内后外、基面先行。划分加工工序应遵循保持精度原则和提高生产效率原则。数控车床适合加工的零件类型有：轮廓形状特别复杂或难于控制尺寸的回转体零件、精度要求高的回转体零件、带特殊螺纹的回转体零件。

数控车削加工零件的工艺性分析从以下几个方面入手：零件图的分析（包括零件的尺寸标注方法、几何要素、精度及技术要求的分析），结构工艺性分析以及零件安装方式的选择（力求设计、工艺与编程计算得基准统一，尽量减少装夹次数，在一次装夹后完成所有表面的加工）。具体步骤如下：

1）分析被加工零件的图样，明确工序加工内容及技术要求。

2）确定零件的加工方案，制定数控加工工艺路线。如划分工序、安排加工顺序，处理与非数控加工工序的衔接等。

3）加工工序的设计。如选取零件的定位基准、装夹方案的确定、工步划分、刀具选择和确定切削用量等。

4）数控加工程序的调整。如选取对刀点和换刀点、确定刀具补偿及确定加工路线等。

4.3.2 走刀路线的确定

走刀路线是指数控加工过程中刀具相对于被加工件的运动轨迹和方向。加工路线的合理选择是非常重要的，因为它与零件的加工精度和表面质量密切相关。在确定走刀路线时主要应考虑下列几点：

1）保证零件的加工精度要求。

2）方便数值计算，减少编程工作量。

3）寻求最短加工路线，减少空刀时间以提高加工效率。

如图 4-12 所示，粗车几种不同切削进给路线的示意图。在同等条件下，图 4-12c 切削所需时间（不含空行程）最短，刀具的损耗最少。

4）尽量减少程序段数。

5）保证工件轮廓表面加工后的粗糙度要求，最终轮廓应安排为连续加工。

6）数控车床加工刀具的进退刀（切入与切出）路线也要认真考虑，以尽量减少在轮廓处停刀（切削力突然变化造成弹性变形）而留下刀痕，也要避免在轮廓面上垂直下刀而划伤工件。

在车螺纹时，沿螺距方向的进给要有引入距离 δ_1 和超越距离 δ_2，如图 4-13 所示。一般 δ_1 为 2 ~ 5mm，当主轴转速较大或者加工大螺距和高精度的螺纹时取大值；δ_2 一般取 δ_1 的 1/2 左右。若螺纹末端没有退刀槽时，其形状与数控系统有关，一般按 45°退刀。

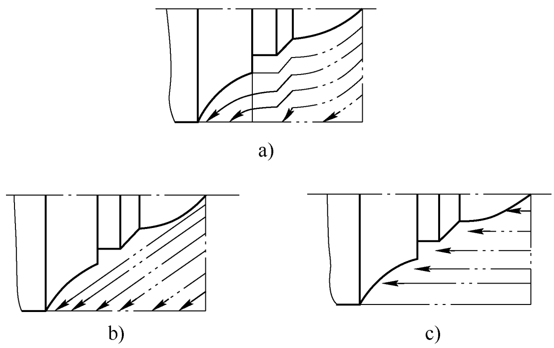


图 4-12　粗车进给路线示例

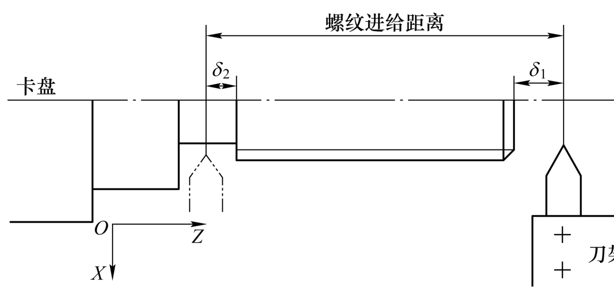


图 4-13　车削螺纹时引入距离和超越距离

总之，在确定走刀路线时，应在保证加工精度、表面质量以及加工安全的前提下，使走刀路线和加工程序最短，不仅可以节省加工时间，还可减少不必要的刀具磨损及机床的机动时间，延长刀具及数控车床的使用寿命。

4.3.3　车削用夹具的选择

在数控车床加工中，一般使用工件及毛坯的外圆或者内孔定位，常用夹具主要是各种卡盘，但也有其他类型的夹具。

1. 卡爪式夹具

（1）自定心卡盘　自定心卡盘是数控车床最常见的夹具。特点是三个卡爪是同步运动的，可以自动定心，夹持工件一般不需要找正，装夹速度较快。但夹紧力较小，定心精度不高，适于装夹外形规则的中小工件，不适合同轴度要求较高的二次装夹。

三爪可以装成正爪（图 4-14b），也可以装成反爪（图 4-14c），分别适用于装夹较小直径和较大直径工件。

数控车床也可采用液压或气动式三爪卡盘，其夹紧力由液压或气动机构提供，通过液压或气压来调整夹紧力，以满足不同工件的需要，此类卡盘也叫动力卡盘。此类卡盘的使用，可以使数控车床的装夹效率更高，夹持也更为可靠。

（2）单动卡盘　单动卡盘如图 4-15 所示，四个卡爪是各自独立运动的，这样可以调整夹持部位相对于车床主轴的径向位置，使工件表面的回转中心与车床主轴的回转中心重合。其特点是夹紧力较大，装夹精度较高，不受卡爪磨损的影响，还可以调整为偏心装夹，但是夹持时需要找正，装夹效率较低。适用于装夹偏心距较小、外形不规则或者同轴度精度要求

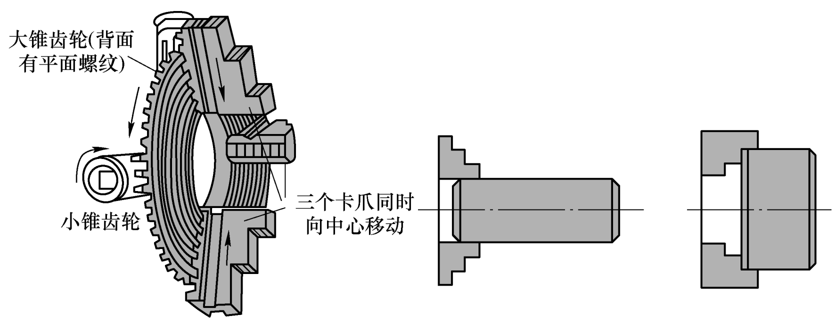


图 4-14　自定心卡盘基本结构以及卡爪的不同装夹方式
a）结构　b）正爪夹持小棒料　c）反爪夹持大棒料

较高的二次装夹。

（3）软爪　软爪是一种具有切削性能的卡爪。软爪的目的是成批进行精加工，使工件的重复定位精度提高而采取的措施。基本过程就是，将软爪装夹工件的接触面事先进行加工，以达到准确定位的要求（图 4-16）。

但是要注意的是，软爪在加工时是在夹紧状态下进行的，其目的是避免加工过程中的松动和反向间隙引起的定心误差。

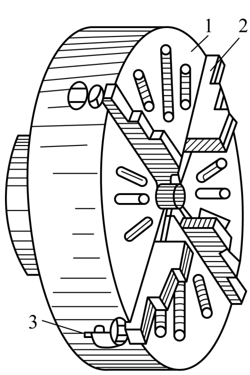


图 4-15　单动卡盘
1—盘体　2—卡爪　3—单动丝杠

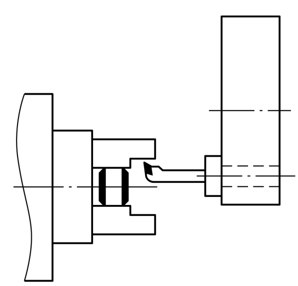


图 4-16　加工软爪

（4）花盘、弯板　花盘与弯板用于装夹非回转体零件，如图 4-17 所示。

（5）双顶尖　对于长度较长或必须经过多次装夹才能加工的工件，如细长轴、长丝杠等的车削，可以用两顶尖装夹。两顶尖装夹工件方便，不需找正，装夹精度高（图 4-18）。

利用两顶尖装夹定位还可以加工偏心工件（图 4-19）。

2. 其他夹具

数控车床还可能会用到其他夹具。常见的包

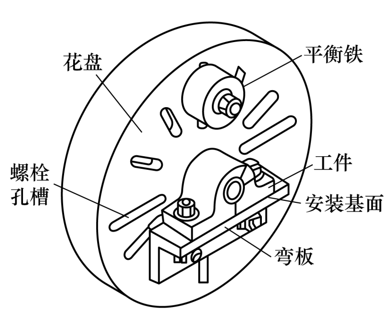
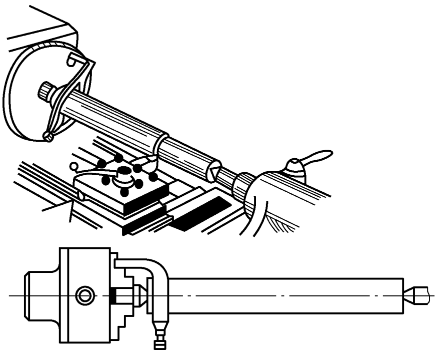


图 4-17　花盘、弯板装夹


图 4-18　两顶尖装夹工件

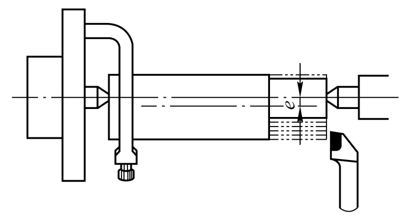


图 4-19　两顶尖车偏心轴

括弹性自定心夹具、尾座顶尖、拨动顶尖和自定心中心架等。其中弹性自定心夹具的特点是：利用弹性体零件在外加夹紧力的作用下，产生均匀弹性变形，依靠该变形实现工件定心夹紧。

4.3.4　切削用量的选择

切削用量包括主轴转速（切削速度）、背吃刀量、进给量。对于不同的加工系统（包括数控车床、夹具、刀具和工件材料等形成的加工系统）和零件图样精度要求要合理地选择合适的切削用量。

合理选择切削用量的原则：粗加工时，一般以提高生产效率为主，但也应考虑经济性和加工成本；半精加工和精加工时，应在保证加工质量的前提下，兼顾切削效率、经济性和加工成本。具体数值应根据机床说明书、切削用量手册，并结合经验而定。

1. 背吃刀量 a_p（mm）

主要根据机床、夹具、刀具和工件的刚度来确定。在刚度允许的情况下，应以最少的进给次数切除加工余量，以便提高生产效率。在数控机床上，精加工余量可小于普通机床。

2. 主轴转速 n（r/min）

主要根据切削速度 v（m/min）选取。主轴转速 n 要根据计算数值选取机床主轴转速的标准值。

$$n = 1000v/\pi D$$

式中，v 为切削速度，由刀具的寿命决定，可查有关手册或刀具说明书；D 为工件或刀具直径（mm）。

这里要注意的是，如果所用数控车床主轴有无级变速功能，那么程序中主轴转速数值直接采用切削速度 v（采用恒定线速度）即可。表 4-1 为硬质合金外圆车刀切削速度的参考值，选用时可参考选择。

表 4-1　硬质合金外圆车刀切削速度的参考数值

工件材料	热处理状态	a_p=0.3~2mm	a_p=2~6mm	a_p=6~10mm
		f=0.08~0.3mm/r	f=0.3~0.6mm/r	f=0.6~1mm/r
		v_c/(m/min)		
低碳钢、易切钢	热轧	140~180	100~120	70~90
中碳钢	热轧	130~160	90~110	60~80
	调质	100~130	70~90	50~70

（续）

工件材料	热处理状态	$a_p=0.3\sim2mm$	$a_p=2\sim6mm$	$a_p=6\sim10mm$
		$f=0.08\sim0.3mm/r$	$f=0.3\sim0.6mm/r$	$f=0.6\sim1mm/r$
		v_c/(m/min)		
合金结构钢	热轧	100~130	70~90	50~70
	调质	80~110	50~70	40~60
工具钢	退火	90~120	60~80	50~70
灰铸铁	<190HBW	90~120	60~80	50~70
	190~225HBW	80~110	50~70	40~60
高锰钢（Mn13%）			10~20	
铜、铜合金		200~250	120~180	90~120
铝、铝合金		300~600	200~400	150~200
铸铝合金		100~180	80~150	60~100

注：切削钢、灰铸铁时的刀具寿命约为60min。

3. 进给量（进给速度）f(mm/min 或 mm/r)

主要根据零件的加工精度和表面粗糙度要求，以及刀具、工件的材料性质选取。当加工精度、表面粗糙度要求高时，进给量数值应小些。最大进给量则受机床刚度和进给系统的性能限制，并与脉冲当量有关。表4-2是按表面粗糙度选择进给量的参考值。

表4-2　硬质合金外圆车刀粗车外圆及端面的进给量

工件材料	刀杆尺寸 $B\times H$/mm×mm	工件直径 d_w/mm	背吃刀量（a_p/mm）				
			≤3	>3~5	>5~8	>8~12	>12
			进给量f/(mm/r)				
碳素结构钢 合金结构钢 耐热钢	16×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.5~0.7	0.4~0.6	0.3~0.5	—	—
		100	0.6~0.9	0.5~0.7	0.5~0.6	0.4~0.5	—
		400	0.8~1.2	0.7~1.0	0.6~0.8	0.5~0.6	—
	20×30 25×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.5~0.7	0.5~0.7	0.4~0.6	—	—
		100	0.8~1.0	0.7~0.9	0.5~0.7	0.4~0.7	—
		400	1.2~1.4	1.0~1.2	0.8~1.0	0.6~0.9	0.4~0.6
铸铁 铜合金	16×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.5~0.8	0.5~0.8	0.4~0.6	—	—
		100	0.8~1.2	0.7~1.0	0.6~0.8	0.5~0.7	—
		400	1.0~1.4	1.0~1.2	0.8~1.0	0.6~0.8	—

（续）

工件材料	刀杆尺寸 $B\times H$/mm×mm	工件直径 d_w/mm	背吃刀量（a_p/mm）				
			≤3	>3~5	>5~8	>8~12	>12
			进给量 f/（mm/r）				
铸铁 铜合金	20×30 25×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.5~0.9	0.5~0.8	0.4~0.7	—	—
		100	0.9~1.3	0.8~1.2	0.7~1.0	0.5~0.8	—
		400	1.2~1.8	1.2~1.6	1.0~1.3	0.9~1.1	0.7~0.9

注：1. 加工断续表面及有冲击工件时，表中进给量应乘系数 $k=0.75\sim0.85$。
2. 在无外皮加工时，表中进给量应乘系数 $k=1.1$。
3. 在加工耐热钢及合金钢时，进给量不大于 1mm/r。
4. 加工淬硬钢，进给量应减小。当钢的硬度为 44~56HRC 时，应乘系数 $k=0.8$；当钢的硬度为 56~62HRC 时，应乘系数 $k=0.5$。

4.4　数控车削编程

4.4.1　数控机床加工中的坐标系统

1. 数控机床坐标系

为了确定机床的运动方向、移动的距离，需要在机床上建立一个坐标系，这个坐标系就是机床坐标系。机床坐标系是机床的硬件的坐标系统。在编制程序时，以该坐标系来规定运动的方向和距离。

规定数控机床坐标系，是为了准确描述机床运动，简化程序编制，并且使所编程序具有一定互换性。目前，国际标准化组织已经统一了标准坐标系。我国已制定了 GB/T 19660—2005《工业自动化系统与集成　机床数值控制坐标系和运动命名》，对数控机床的坐标和运动方向做了明确规定。

（1）坐标和运动方向命名原则　数控机床在加工工件时可以是刀具移动、工件静止，也可能是刀具静止、工件移动，甚至是刀具与工件都在移动。为了能够方便的根据图样确定数控机床的加工过程，特规定：永远假定刀具移动、工件静止。

（2）坐标系的规定　数控机床上的坐标系采用右手笛卡尔直角坐标系。这个坐标系的各个坐标轴与机床的主要导轨相平行。直角坐标系 X、Y、Z 三者的关系及其方向用右手定则判定；围绕 X、Y、Z 各轴回转的运动及其正方向 $+A$、$+B$、$+C$ 分别用右手螺旋定则确定。

（3）运动方向的确定　GB/T 19660—2005 规定：机床坐标轴移动的正方向是增大工件和刀具之间距离的方向。确定机床坐标轴应先确定 Z 轴，然后再确定 X 轴和 Y 轴。

1）Z 轴的确定。Z 轴的方向是由传递切削力的主轴确定的，与主轴轴线平行的坐标轴为 Z 轴，并且刀具远离工件的方向为 Z 轴的正方向。对于没有主轴的机床，则以与装夹工件的工作台面相垂直的直线作为 Z 轴方向。如果机床有多根主轴，则选择其中一个与工作台面相垂直的主轴，并以它来确定 Z 轴方向（如龙门铣床）。

2）X 轴的确定。平行于导轨面，且垂直于 Z 轴的坐标轴为 X 轴。对于工件旋转的机床（如车床、磨床等），X 坐标的方向在工件的径向上，且平行于横滑座导轨面。刀具远离工件旋转中心的方向为 X 轴正方向。对于刀具旋转的机床（如铣床、镗床、钻床等），如果 Z 轴是垂直的，则面对主轴看立柱时，水平向右为 X 轴的正方向。如果 Z 轴是水平的，则面对主轴看立柱时，水平向左为 X 轴的正方向。

3）Y 轴的确定。Y 坐标轴垂直于 X、Z 坐标轴。Y 运动的正方向根据 X 坐标和 Z 坐标的正方向，按照右手笛卡尔直角坐标系来判断，如图 4-20 所示。

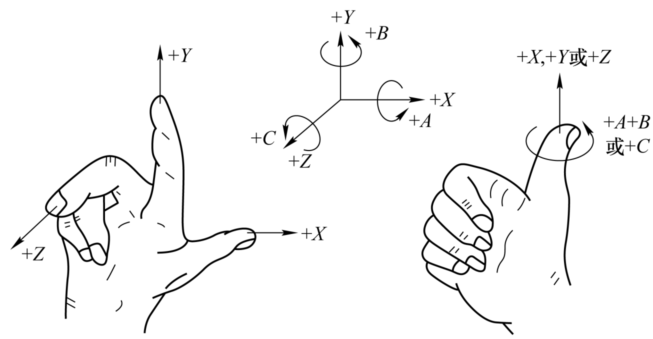


图 4-20　右手笛卡尔直角坐标系

（4）机床坐标系原点　机床坐标系原点又叫机床零点、机械零点（M）。在规定了机床坐标轴和方向后，必须再确定机床原点，才能建立机床坐标系。机床坐标系原点是机床上一个固定点，其位置由机床设计和生产厂家确定（使用者一般无法改变），可由该机床的操作使用说明书（手册）查阅。

数控车床的坐标系原点一般设置在卡盘的前端面或后端面中心处。本节主要介绍的是 SINUMERIK 840D 系统车床，其机床坐标系原点设置在卡盘的后端面中心处（图 4-22）。

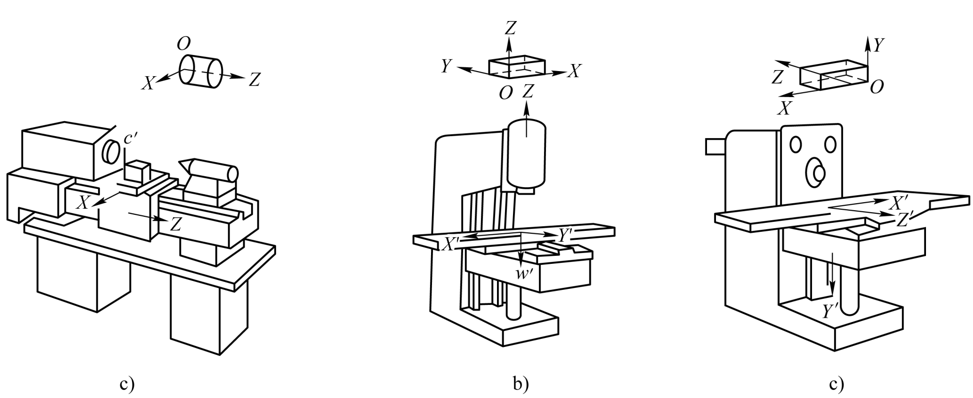


图 4-21　数控机床坐标系

a）数控卧式车床坐标系　b）数控立式铣床坐标系　c）数控卧式铣床坐标系

（5）机床参考点　机床参考点是用于对机床运动进行检测和控制的固定位置点。机床参考点的位置是由机床制造厂家在每个进给轴上用限位开关精确调整好的，坐标值已输入数控系统中。因此参考点对机床原点的坐标是一个固定值，而且每次回参考点其

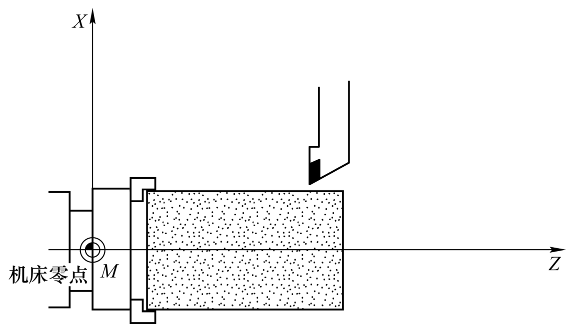


图 4-22　数控车床坐标系原点

实就是一次重新确定机床坐标系的过程，在数控操作中所谓的“回零”回的就是此点（图 4-23）。

2. 工件坐标系

工件坐标系又叫做零件坐标系、加工坐标系、编程坐标系，是在机床坐标系的基础上人为设置的，是在机床坐标系中建立的新坐标系统，用于确定工件几何图形上各几何要素（如点、直线、圆弧等）的位置，供编程人员在编程时使用。而工件坐标系作为方便进行工件加工而设置的临时坐标系，可以通过系统的坐标系设置界面随时更改。

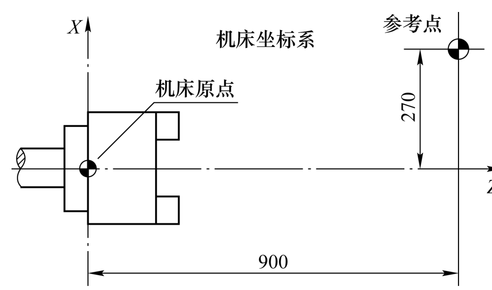


图 4-23　数控机床参考点示意图

工件坐标系原点就是工件原点，又叫加工原点、编程原点。工件原点是为了方便编程，由编程人员设置的，其设置原则是：数值计算简单、方便编程。

数控车削加工为计算方便和简化编程，通常是把工件坐标系的原点选在工件的回转中心上，具体位置可考虑设置在工件的左端面（或右端面）上，应尽量使编程基准与设计、安装基准重合。

3. 机床坐标系和工件坐标系之间的联系

当工件安装在机床上以后，机床坐标系和工件坐标系的原点一般是不会重合的，工件的原点相对于机床的原点，在各坐标轴方向有位移量，通过对刀操作可以测定。

因此，编程人员在编制程序时，只要根据零件图样就可以选定编程原点，建立编程坐标系，计算坐标数值，而不必考虑工件毛坯装夹的实际位置。对加工人员来说，则应在装夹工件、调试程序时，确定加工原点的位置，并在数控系统中给予设定（即给出原点设定值），这样数控机床才能按照准确的加工位置进行加工。

4.4.2　数控车床基本编程指令及编程方法

1. 数控车床编程规则

（1）程序命名规则　SINUMERIK 840D 数控系统要求每个程序都有程序名，在编制程序时可以按以下规则确定程序名：名称的长度不得超过 24 个字符，因为在数控系统上只能显示程序名称最前面的 24 字符，可以使用字母（不分大小写）、数字或下划线；不得使用分

隔符；小数点仅可以用于标识文件的扩展名；主程序扩展名为 . MPF；子程序扩展名为 . SPF。

如：A001. MPF　B301. SPF

（2）程序格式　一个完整的加工程序由若干程序段组成，程序开头是程序名，结束时写有程序结束指令。

程序段一般由若干个指令字（又叫功能字、数控指令）组成，每两个指令字之间有空格符，一般是以程序段号“N”开头，以结束符“;”结束。在程序编写过程中进行换行时或按输入键时可以自动产生段结束符。指令字由一个地址符（一般是英文字母，不区分大小写）和一个数字或者一串数字组成。

程序段中有很多指令时，为了使程序段清晰明了建议按如下顺序排列（如果调换指令顺序，不影响程序执行）：

N＿G＿X＿Z＿F＿S＿T＿D＿M＿H＿…

注意：① 在一个程序段中可以包含 512 个字符（包括解释字符）；

② 在一个程序段中不一定所有字母都出现，同时在一个程序段中有的字母可能会出现多次；

③ 本系统在程序段中还可能出现运算符号和一些特殊字符（如各种括号、“;”、“/”等）。“;”的含义是注释引导，即其后内容为注释，数控系统不会执行。“/”在程序段开头的含义是程序段跳跃（与 M1 配合使用）。常用指令含义见表 4-3。

表 4-3　常用指令含义

指　　令	含　　义
N	程序段号地址
G	准备功能
X，Z	位移信息
F	进给率
S	主轴转速
T	刀具
D	刀具补偿号
M	辅助功能
H	附加功能

2. 数控车床基本指令

数控指令（指令字）是程序的最小单元，一般是由字母和数字组成。一般数控指令可以分为以下几类：准备功能指令、辅助功能指令和其他功能指令。

（1）准备功能指令　准备功能指令，又叫 G 指令，是在数控系统插补运算之前需要预先规定，为插补运算做好准备的工艺指令。G 指令一般由 G 后跟两位数组成，但本系统中所有指令的第一个数字“0”可省略（如：G00 与 G0 等效）。SINUMERIK 840D 数控车床 G 指令及功能见表 4-4。

表 4-4　SINUMERIK 840D 数控车床 G 指令及功能

序　　号	指　　令	组　　别	功　　能	备　　注
1	G0	第 1 组 运动指令 （插补方式）	快速定位	
2	G1		以进给速率直线插补	*
3	G2		顺时针圆弧插补	
4	G3		逆时针圆弧插补	
5	G33		螺纹切削（恒螺距）	
6	G34		螺纹切削（螺距增大）	
7	G35		螺纹切削（螺距减小）	
8	G4	第 2 组 特殊运动	刀具暂停，不做进给运动	
9	G74		回参考点	
10	G75		回固定的点	
11	G17	第 3 组 平面选择	*XY* 平面	
12	G18		*ZX* 平面	*
13	G19		*YZ* 平面	
14	G40	第 4 组 刀具半径补偿	刀具半径补偿取消	*
15	G41		刀具半径左补偿	
16	G42		刀具半径右补偿	
17	G500	第 5 组 可设定零点补偿	取消可设定零点偏置	*
18	G54		第一可设定零点偏置	
19	G55		第二可设定零点偏置	
20	G56		第三可设定零点偏置	
21	G57		第四可设定零点偏置	
22	G58		第五可设定零点偏置	
23	G59		第六可设定零点偏置	
24	G53	第 6 组 取消可设定零点偏置	取消可设定零点偏置 程序段有效	
25	G60	第 7 组 定位性能	准停	*
26	G64		连续路径方式	
27	G9	第 8 组 程序段准停	准停 程序段有效	
28	G70	第 9 组 寸制/米制尺寸	寸制尺寸	
29	G71		米制尺寸	*
30	G90	第 10 组 绝对/增量尺寸	绝对尺寸	*
31	G91		增量尺寸	
32	G94	第 11 组 进给率单位	进给率 *F* 单位：mm/min	
33	G95		进给率 *F* 单位：mm/r	*
34	G96	第 12 组 主轴速度单位	恒定切削线速度开	
35	G97		恒定切削线速度取消	*

注：1. 表中第 2、6、8 组指令都是在本程序段有效，即都为非模态指令，其余指令均为模态指令。
2. 在每组模态指令组别中，备注栏中都有一个带有“*”的指令表示机床通电就起效，即系统默认指令。
3. 每组指令在同一程序段中只能出现一个，但是不同组指令可以在同一程序段中出现。

G 指令按功能类别分为模态指令和非模态指令。模态指令是指一旦被指定，功能一直保持到出现同组其他代码时才失效，否则继续保持有效。非模态指令只在本程序段中有效。

（2）辅助功能指令　辅助功能主要用于机床开关量的控制。如主轴的起停、切削液的开关等。常用辅助功能的 M 指令的含义和用途见表 4-5。

表 4-5　常用辅助功能的 M 指令的含义和用途

序　号	指　令	含　义	用　途
1	M0	程序停止	在数控程序段中使用 M0 使加工停止。可以进行去除切屑、再次测量等工序
2	M1	可选停止	可以通过机床面板操作设定，中断加工过程。这样，操作人员就可以在加工过程中进行一些操作，比如去除切屑、测量等
3	M2	主程序结束	用于程序的最后程序点，表示程序结束，机床处于复位状态，并返回到程序开始
4	M3	主轴顺时针旋转	主轴正转
5	M4	主轴逆时针旋转	主轴反转
6	M5	主轴停止	主轴停止运行
7	M6	换刀	用于加工中心换刀
8	M8	切削液开	切削液打开
9	M9	切削液关	切削液关闭
10	M17	子程序结束	子程序结束，返回主程序
11	M30	程序结束	程序结束，效果同 M2

（3）坐标功能指令　数控车床的坐标功能指令（X、Z 指令）格式是 X（Z）之后接坐标位置。但是需要注意的是直径方向（*X* 轴坐标）用绝对坐标编程时以直径值表示，用增量坐标编程时以径向实际位移量的两倍表示，并附上方向符号。

3. 常用指令的运用

1）常用特殊字符。SINUMERIK 840D 系统编程可以使用一些特殊字符，见表 4-6。

表 4-6　常用特殊字符及用途

特殊字符	含　义	特殊字符	含　义
%	程序起始符（仅用于在外部 PC 上编程）	"	引号，字符串标识
（	括号参数或者表达式	´	单引号，特殊数值标识：十六进制，二进制
）	括号参数或者表达式	$	系统自带变量标识
[	括号地址或者组变址	_	下划线，与字母等同
]	括号地址或者组变址	?	备用
<	小于	!	备用
>	大于	.	小数点
：	主程序，标签结束，级联运算器	，	逗号，参数分隔符

（续）

特殊字符	含　义	特殊字符	含　义
=	分配，相等部分	;	注释引导
/	除法，程序段跳跃	&	格式化符，与空格符意义相同
*	乘法	$^{L}_{F}$	程序段结束
+	加法	制表符	分隔符
-	减法，负号	空格键	分隔符（空格）

2）主轴转速指令（S），主轴旋转方向（M3，M4，M5），主轴是否恒定切削线速度（G96、G97）。功能：设定主轴转速和旋转方向，可使主轴发生旋转偏移，它是切削加工的前提条件。

G96：恒定切削线速度，单位：m/min。

G97：取消恒定切削线速度，单位：r/min。

格式：G96（G97）S __ M3（M4、M5）

示例：

N100 G96 S120 M4;　　　　主轴反转，转速 120m/min

…

N150 G97 S1000 M3;　　　　主轴正转，转速 1000r/min

…

N180 M5;　　　　　　　　主轴停

3）刀具指令（T），刀具补偿指令（D）。功能：在数控车床中使用 T 指令，在刀库中查找并更换目标刀具，同时激活、调用所存储的刀具补偿值 D。

格式：T __ D __

示例：

N86 T1 D1;　　　　更换 1 号刀具，并调用 1 号刀具的 1 号补偿

…

T3 D1;　　　　　　更换 3 号刀具，并调用 3 号刀具的 1 号补偿

4）进给率指令（F），进给速度单位指令（G94、G95）。功能：设定刀具切削时的进给速度数值及单位。

G94：线性进给率，单位：mm/min。

G95：旋转进给率，单位：mm/r（车床默认）。

G95 以主轴转速为基准（通常为切削主轴或车床上的主轴）。

格式：N110 G94（G95）F __

示例：

N100 G95 F0.1;　　　　刀具切削进给速度为 0.1mm/r

…

N150 G94 F100;　　　　刀具切削进给速度为 100mm/min

5）平面选择指令。功能：每两个坐标轴确定一个平面。第三个坐标轴始终垂直于该平面。在编程时需要指定控制系统在哪一个平面上加工，才能正确地计算刀具补偿。对于确定圆弧编程方式和极坐标系，平面的定义同样很有必要。

G17：XY 平面。

G18：XZ 平面（车床默认）。

G19：YZ 平面。

格式：

G17（G18、G19）

6）快速定位指令。功能：G0 指令是使刀具以预先设定好的最快进给速度，从刀具所在位置快速运动到指定位置。该指令只是快速定位，无运动轨迹要求（运动轨迹可能不是一条直线），进给速度指令对 G0 无效。因此，要注意刀具在运动过程中是否与工件或者夹具发生干涉。

格式：G0 X __ Z __

示例：

…

N100 G0 X40 Z58；　　　刀具从 *A* 点快速移动到 *B* 点

…

7）直线插补指令。功能：使用 G1 可以让刀具以指定的进给速度沿直线轨迹进给到目标位置。

格式：G1 X __ Z __ F

示例：

…

N110 G1 X40 Z0 F0.1；　　刀具从 B 点以 0.1mm/r 的速度进给到 D 点

…

G0、G1 指令示意如图 4-24 所示。

8）圆弧插补指令。功能：使用 G2 或者 G3 可以让刀具以指定的进给速度沿圆弧轨迹进给到目标位置。

G2：顺时针圆弧插补。

G3：逆时针圆弧插补。

圆弧方向判断方法：沿圆弧所在平面的垂直轴。向负方向看去，顺时针为 G2，逆时针为 G3（图 4-25）。

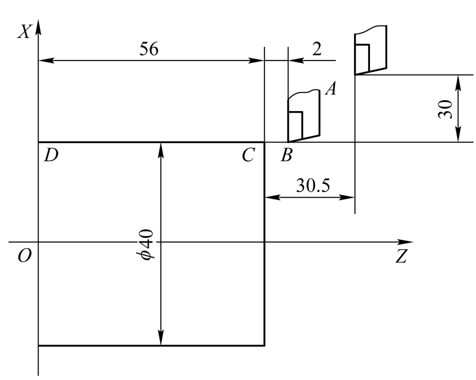


图 4-24　G0、G1 指令示意

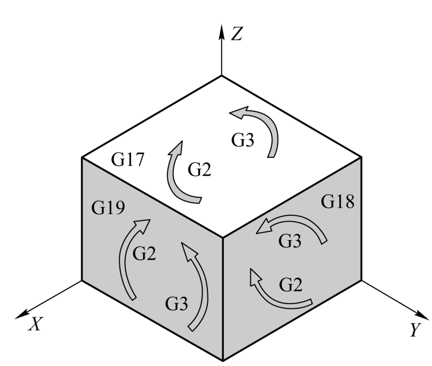


图 4-25　圆弧方向判断方法

格式一：以圆弧起点终点和圆心编程

G2（G3）X __ Z __ I __ K __ F __

其中 X、Z 为圆弧终点坐标，I、K 为圆心相对于圆弧起点的相对坐标。

格式二：以圆弧终点、半径编程

G2（G3）X __ Z __ CR = __ F __

其中 X、Z 为圆弧终点坐标，CR 为圆弧半径。

格式一示例（图 4-26）：

…

N100 G1 X0 Z0 F0.1；	刀具以 0.1mm/r 的速度直线进给到圆弧起点（0，0）
N110 G3 X24 Z－24 I0 K－15；	刀具以 0.1mm/r 的速度切削 *R*15 的圆弧到（24，－24）
N120 G2 X26 Z－31 I8 K－3；	刀具以 0.1mm/r 的速度切削半径 *R*5 的圆弧到（26，－31）

…

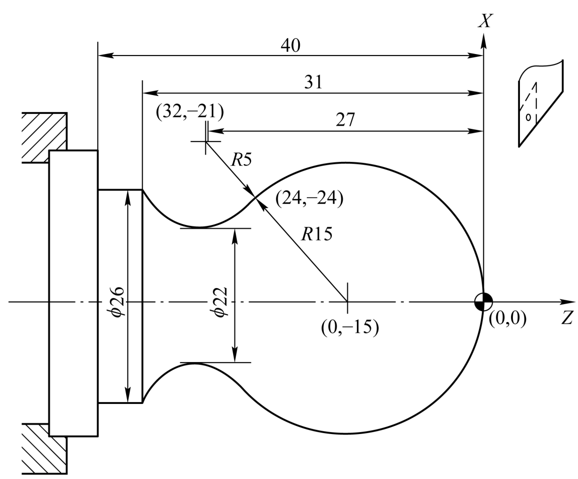


图 4-26　含圆弧的零件图一

格式二示例：

…

N100 G1 X0 Z0 F0.1；	刀具以 0.1mm/r 的速度直线进给到圆弧起点（0，0）
N110 G3 X24 Z－24 CR＝15；	刀具以 0.1mm/r 的速度切削 *R*15 的圆弧到（24，－24）
N120 G2 X26 Z－31 CR＝5；	刀具以 0.1mm/r 的速度切削 *R*5 的圆弧到（26，－31）

…

格式三：以张角和终点坐标（圆心坐标）编程

G2（G3）X __ Z __ AR = __ F __

或者 G2（G3）I __ K __ AR = __ F __

其中 AR 表示张角，取值范围 0°～360°。

格式三示例（图 4-27）：

…

N100 G1 X40 Z－25 F0.2；	刀具以 0.2mm/r 的速度直线进给到圆弧起点（40，－25）

N110 G3 X70 Z－75 AR＝135.944；　　采用圆弧终点和圆弧张角进行圆弧进给

…

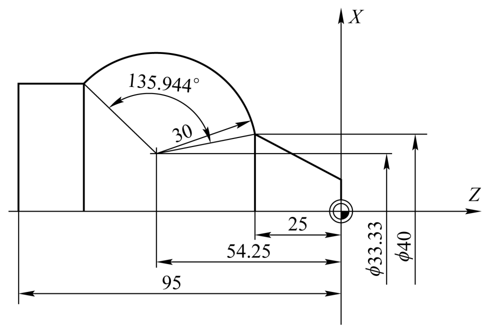


图 4-27　含圆弧的零件图二

格式四：在极坐标中，以极角和极半径编程。

G2（G3） AP＝__ RP＝__ F __

其中 AP 为极角，RP 为极半径。极点为圆心，并且极半径相当于圆弧半径。

格式四示例：

…

N100 G1 X40 Z－25 F0.2；　　刀具以 0.2mm/r 的速度直线进给到圆弧起点（40，－25）

N110 G3 RP＝30 AP＝142.326；　　以极坐标方式进行圆弧插补

…

格式五：以中间点和终点坐标编程。

G2（G3） X __ Z __ I1＝__ K1＝__ F __

其中 I1、K1 分别表示中间点的 X 轴、Z 轴坐标值。

格式五示例（图 4-28）：

…

N100 G1 X40 Z－25 F0.2；　　刀具以 0.2mm/r 的速度直线进给到圆弧起点（40，－25）

N110 G3 X70 Z－75 I1＝93.33 K1＝54.25；　　以中间点进行圆弧插补

…

9）暂停指令。功能：使用 G4 指令可以让刀具在限定时间内或者主轴限定转数内暂停进给。

格式：G4 F __　在指令 F 下以秒为单位设定暂停时间。

　　　G4 S __　在指令 S 下以主轴转数为单位设定暂停时间。

示例：

…

N50 G4 F3；　　暂停时间：3s

…

N90 G4 S30；　　主轴停留 30 转的时间（相应的在转速为 300r/min 时：t＝6s）。

10）尺寸编程方式指令。功能：用于确定坐标输入方式。

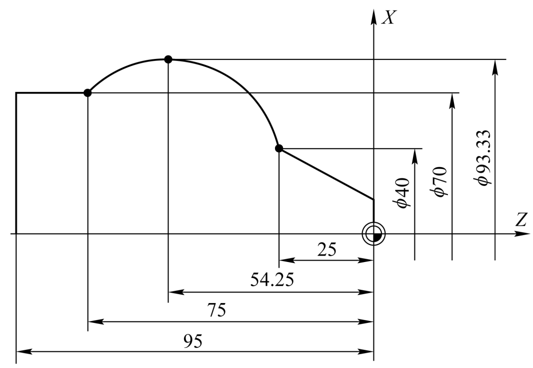


图 4-28　含圆弧的零件图三

G90：绝对坐标输入，在绝对尺寸中，位置数据总是取决于当前有效坐标系的零点（系统默认）。

G91：增量坐标输入，在增量尺寸中，位置数据取决于上一个运行到的点，即终点相对于起点的坐标（图 4-29）。

格式：G90（G91）

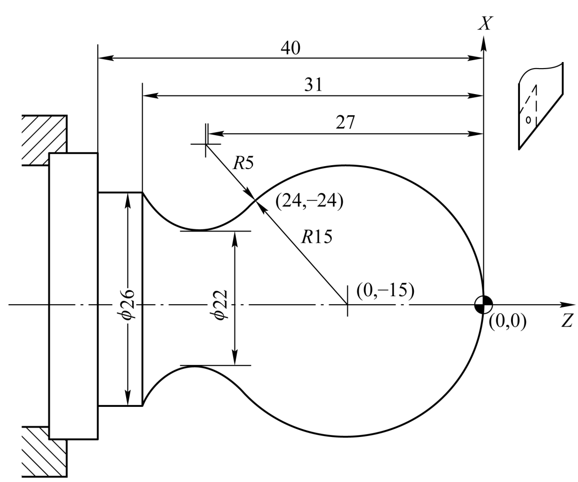


图 4-29　G90、G91 指令示意图

示例一：

…

N100 G90 G1 X0 Z0 F0.1;　　绝对坐标编程

N110 G3 X24 Z−24 CR=15;

N120 G91 G2 X2 Z−7 I8 K−3;　　相对坐标编程

N130 G1 Z−9;

…

示例二：

…

N100 G90 G1 X0 Z0 F0.1;　　绝对坐标编程

N110 G3 X24 Z－24 CR＝15；

N120 G91 G2 X＝AC（26）Z＝AC（－31）I8 K－3； 相对坐标编程，但终点坐标用绝对坐标值表示

N130 G1 Z－9；

…

11）子程序。功能：如果编写不同的工件时需要使用相同的加工步骤，可以在独立的子程序中定义这些加工步骤，然后可在任意程序中调用该子程序，这样可以简化程序，提高编程效率，降低编程难度。子程序中，还可以调用其他子程序，最大嵌套深度为10个子程序。

格式：<子程序名> P

其中P后接数据为调用该子程序次数,取值范围为1～99。仅调用该子程序一次时，P1可省略。

12）坐标转换指令。功能：坐标转换指令可以在同一程序中对坐标系进行调整。

G54～G57：通过可设定的零点偏移，可以在所有轴上依据基准坐标系的零点设置工件零点。

G53：在本程序段取消可设定零点偏移和可编程零点偏移。

TRANS：可编程零点偏移，表示相对于当前所调用的G54～G57中有效坐标系的坐标原点进行平移。

示例（图4-30）：

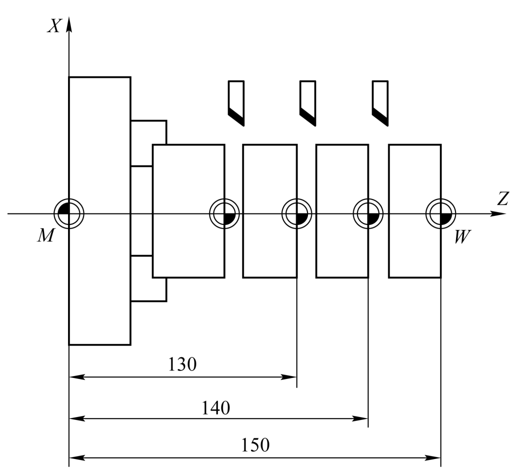


图4-30 坐标转换指令

注：M点为机床零点，W点为工件坐标系零点。

N10 G54；	建立工件坐标系
N20 L20；	调用子程序，切削第一部分
N30 TRANS X0 Z－10；	坐标系平移到距离机床坐标系140mm处
N40 L20；	调用子程序，切削第二部分
N50 TRANS Z－20；	坐标系平移到距离机床坐标系130mm处
N60 L20；	调用子程序，切削第三部分

…

4.4.3　固定循环与子程序

对于数控机床而言，一些需要多次进刀切削或者轮廓比较复杂的轮廓表面，可以采用固定循环编程。固定循环可以有效地缩短程序长度、减少程序所占内存空间、减少计算量、节省编程时间。

1. 轮廓车削循环

（1）功能　轮廓车削循环可以将一个坯件加工成任意一个自由编程的轮廓。通过该循环，可以在纵向或者横向加工内外轮廓。可自由选择工艺（粗加工、精加工、综合加工）。

（2）格式　CYCLE95（“NPP”，MID，FALZ，FALX，FAL，FF1，FF2，FF3，VARI，DT，DAM，_VRT）。CYCLE95 参数见表 4-7。

表 4-7　CYCLE95 参数

参　数	数据类型	含　义
NPP	字符串	轮廓子程序名
MID	实数	最大进刀深度（不输入符号）
FALZ	实数	纵向轴（Z 轴）中精加工余量（不输入符号）
FALX	实数	横向轴（X 轴）中精加工余量（不输入符号）
FAL	实数	与轮廓相符的精加工余量（不输入符号）
FF1	实数	粗加工进给速度，无底切
FF2	实数	粗加工在底切时的进给速度
FF3	实数	精加工进给速度
VARI	整数	加工方式
DT	实数	粗加工时用于断屑的停留时间
DAM	实数	位移长度，每次粗加工切削断屑时，中断该长度
_VRT	实数	粗加工时的退刀位移增量（不输入符号）

（3）含义　轮廓的子程序名（NPP）要么输入轮廓子程序的名称，要么输入程序段号码或程序段标签。轮廓子程序不允许是带有一个参数列表的子程序。所有在编程说明中所描述的命名规范适用于轮廓子程序的名称。

在子程序编程时需要注意以下几点：

1）轮廓定义。以程序段的形式编程轮廓。轮廓必须至少包含 3 个程序段，它们在加工平面的两个轴上产生运动。如果轮廓子程序较短，循环无法运行。

加工平面（G17、G18、G19）在循环调用之前在主程序中设定，也可由机床中 G 功能组的初始设置指定。无法在轮廓中更改加工平面。

非加工平面轴的运动可以包含在轮廓中，但是在循环运行期间，它们的运行行程无效。

2）插补方式。作为轮廓中的几何尺寸，仅允许通过 G0、G1、G2 和 G3 进行直线编程和圆弧编程。此外，也可以编写用于倒圆和棱角的指令。如果在轮廓中编写了其他的运动指令，则该循环无法运行。

在实际加工平面中运行的第一个程序段内必须包含运行指令 G0、G1、G2 或者 G3，否

则该循环无法运行。

3）轮廓编程。轮廓起始点是加工平面上轮廓编程的第一个位置（该点一般用 G1 定义）。之后切削点以轨迹进行插补。在平面中，轮廓最大可以带有运动的程序段数量取决于轮廓自身。底切数量原则上不受限制（图 4-31）。

需要注意的是，轮廓与所用刀具不能发生干涉（特别是有底切时）。

最大进刀深度（MID）定义粗加工过程最大可能的进刀深度。此参数可以取数值 0，系统默认本次循环仅切削一次。

进给速度 FF1、FF2、FF3 的区别如图 4-32 所示。

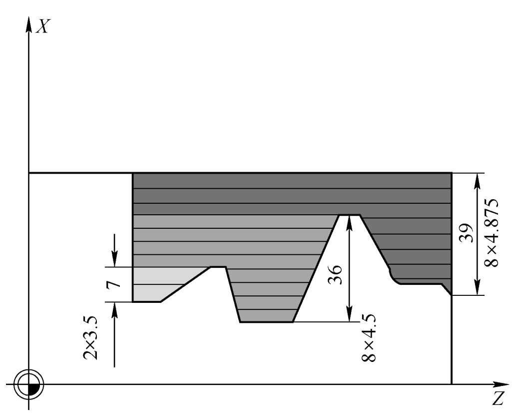


图 4-31　发生两次底切的外轮廓

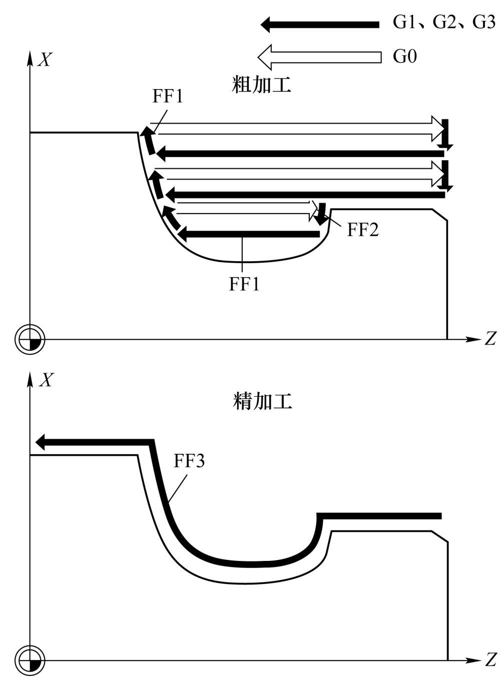


图 4-32　进给速度的区别

加工方式（VARI）选用方法见表 4-8。

表 4-8　加工方式选用方法

VARI 取值	进给方向选择	轮 廓 选 择	加工方式选择
1	纵向	外轮廓	粗加工
2	横向	外轮廓	粗加工
3	纵向	内轮廓	粗加工
4	横向	内轮廓	粗加工
5	纵向	外轮廓	精加工
6	横向	外轮廓	精加工
7	纵向	内轮廓	精加工

（续）

VARI 取值	进给方向选择	轮 廓 选 择	加工方式选择
8	横向	内轮廓	精加工
9	纵向	外轮廓	综合加工
10	横向	外轮廓	综合加工
11	纵向	内轮廓	综合加工
12	横向	内轮廓	综合加工

退刀位移增量（_VRT）可以指定一个退刀量，在粗加工时控制两个轴上退刀。_VRT＝0（参数未编程）时，退刀位移为 1mm。退刀位移总是与编程的尺寸系统（寸制或者米制）相关。

（4）工作过程　循环开始之前刀具起始位置可以为任意位置，但是从这个出发位置快速定位到循环开始点，不可出现轮廓冲突（不可碰撞工件、夹具或者机床其他部位）。循环开始点各进给轴坐标为：轮廓起始点各进给轴坐标＋精加工余量＋退刀位移（参数_VRT）。

循环开始后，循环自行确定加工起始点。在刀具进给到起始点时，循环内部选择刀沿半径补偿。因此，在调用循环之前必须选择好刀具起始位置，保证不会有轮廓冲突，并且有足够的位置用于相应的补偿运动。

1）粗加工，不带底切方式。以 MID 确定的进给深度轴向平行进刀（采用 G0 快速定位方式），按照参数 VARI 选择的进给方向轴向平行以 G1 方式和 FF1 确定的进给速度进给。分层切削，直至最后保留各精加工余量。

2）粗加工，带底切方式。以 G0 方式运行到底切的起始点。以 G1/G2/G3 和 FF2 沿着轮廓＋精加工余量并与轮廓平行进行进刀。如果有其他的底切单元，则重复每个底切的运行。

3）精加工。以 G0 在两个轴上同时运行到所计算的循环起始点，并且选择刀沿半径补偿。沿着轮廓以 G1/G2/G3 和 FF3 进行精加工。两个轴以 G0 退回到起始点。

（5）示例　如图 4-33 所示，要求对 ϕ25mm 毛坯进行粗、精加工，所用刀具分别为粗车外圆刀（T1）、精车外圆刀（T3）。

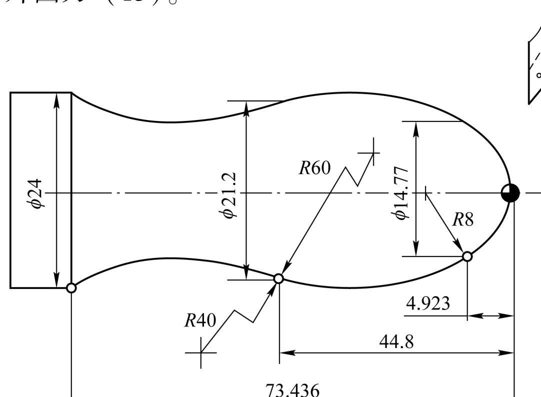


图 4-33　CYCLE95 应用示例

主程序：

A001. MPF

…

N100 T1 D1；　　选用粗车外圆刀

N110 G96 S100 M4 F0.1；　　确定切削用量

N120 CYCLE95（“L1”，3，0.1，0.5，0，0.1，0.05，0，1，0，0，0）；

调用 L1. SPF 子程序，每次最大切削深度 3mm，Z 轴精加工余量 0.1mm，X 轴精加工余量 0.5mm，轮廓精加工余量 0mm，粗加工进给速度 0.1mm/r，粗加工切入进给速度 0.05mm/r，精加工进给速度 0mm/r，加工方式为粗加工、外轮廓、纵向进给，无断屑停留，系统默认退刀 1mm（本次调用为粗加工，所以精加工的参数都可以用数字 0）

N130 G0 X200 Z500；　　退刀

N150 T3 D1；　　更换为精车外圆刀

N160 G96 S120 M4 F0.05；　　确定切削用量

N170 CYCLE95（“L1”，3，0，0，0，0，0，0.07，5，0，0，0）；

调用 L1. SPF 子程序，选择数字 0 表示只加工一次，所有余量都为 0mm，粗加工进给速度 0mm/r，粗加工切入进给速度 0mm/r，精加工进给速度 0.07mm/r，加工方式为精加工、外轮廓、纵向进给，不可断屑停留，系统默认退刀 1mm（本次调用为精加工，所以粗加工的参数都可以用数字 0）

…

子程序：

L1. SPF

N100 G1 X0 Z0；　　确定轮廓开始点

N110 G3 X14.77 Z-4.923 CR=8；　　*R*8 的逆时针圆弧

N120 G3 X21.2 Z-44.8 CR=60；　　*R*60 的逆时针圆弧

N130 G2 X24 Z-73.436 CR=40；　　*R*40 的顺时针圆弧

N140 G1 X24 Z-95；　　ϕ24 圆柱面

N150 G1 X25；　　直线进给到毛坯直径

N160 M17；　　子程序结束

2. 切槽循环

（1）功能　切槽循环可以加工对称的和非对称的槽，用于纵向加工和横向加工，可用在任意的直线轮廓单元中。可以加工外部槽和内部槽。

（2）格式　CYCLE93（SPD，SPL，WIDG，DIAG，STA1，ANG1，ANG2，RCO1，RCO2，RCI1，RCI2，FAL1，FAL2，IDEP，DTB，VARI，_VRT）。CYCLE93 参数见表 4-9。

表 4-9　CYCLE93 参数

参　　数	数据类型	含　　义
SPD	实数	横向轴起始点（不输入符号）
SPL	实数	纵向轴起始点

（续）

参　数	数据类型	含　义
WIDG	实数	切槽宽度（不输入符号）
DIAG	实数	切槽深度（不输入符号）
STA1	实数	轮廓和纵向轴之间的角度（取值范围：0°~180°）
ANG1	实数	起始边与横向轴之间的角度（取值范围：0°~90°）
ANG2	实数	终止边与横向轴之间的角度（取值范围：0°~90°）
RCO1	实数	起始边顶部倒圆（取正值，半径）/倒角（取负值）
RCO2	实数	终止边边顶部倒圆（取正值，半径）/倒角（取负值）
RCI1	实数	起始边底部倒圆（取正值，半径）/倒角（取负值）
RCI2	实数	终止边底部倒圆（取正值，半径）/倒角（取负值）
FAL1	实数	切槽底部的精加工余量
FAL2	实数	侧边的精加工余量
IDEP	实数	进刀深度（不输入符号）
DTB	实数	切槽底部停留时间
VARI	整数	加工方式（取值范围：1~8）
_VRT	实数	可变的退刀位移（自轮廓），增量（不输入符号）

（3）含义　SPD、SPL 定义切槽起始点，自该起始点出发在循环中计算出形状（图 4-34）。由循环确定起始点，该起始点在开始时自行进给到位（起始点处有倒圆或者倒角时，应视忽略倒圆或倒角）。

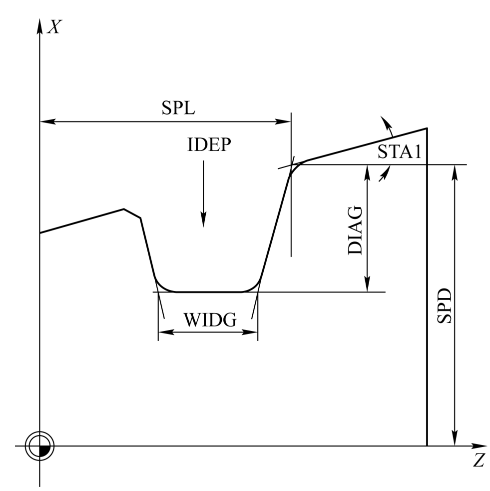


图 4-34　CYCLE93 部分参数示意图

WIDG 为槽底宽度（忽略倒圆或倒角）。

DIAG 为起始点到槽底的单边深度（半径值）。

FAL1、FAL2 可分别对于槽底部和侧边指定精加工余量。粗加工时，一直切削到该精加工余量。然后，沿着最终轮廓，用相同的刀具进行与轮廓平行的切削（本循环是综合加工循环，循环运行结束后，余量为 0）。

RCO1、RCO2、RCI1、RCI2 通过在边缘或底部输入半径/棱角改变切槽形状。必须要注意的是，以正号输入半径，以负号输入棱边。

当 VARI<10 时（十位 =0）该参数作为棱边长度。

当 VARI>10 时，该参数作为倒角的轨迹长度。

DTB 指定在切槽底部停留的时间，以便至少可以进行一次主轴旋转。以秒为单位指定停留时间。

加工方式（VARI）的选用方法如图 4-35，注意圆点表示槽的起始点。

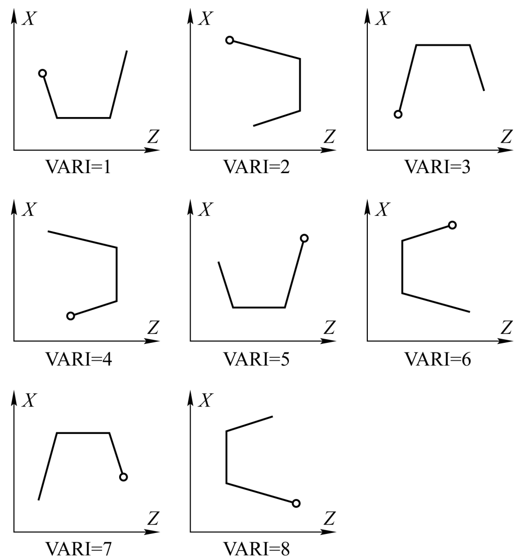


图 4-35　加工方式的选用方法

退刀位移（_VRT）可以通过切槽的外部直径或者内部直径指定退刀位移。

当_VRT = 0 时（没有编程参数），退刀位移为 1mm。切槽时每次深度进给之后，该退刀位移在断屑时同时生效。

（4）工作过程　如图 4-36 所示，在深度方向（到切槽底部）和宽度方向（从起始边到终止边）以最大可能的数值进行划分。在倾斜方向切槽时，从起始边到终止边以最短的位移、平行于锥面运行。具体步骤为：

第 1 步，以单一的进刀尺寸轴向平行粗加工至底部。每次进刀后，空运行至断屑处。

第 2 步，垂直于进刀方向一次和多次加工切槽。此时，要根据进刀深度分配每一次切削。

第 3 步，如果已用 ANG1 或 ANG2 指定角度，则需要切削槽边。如果侧边角度较大，则沿着槽边以多步进刀。

第 4 步，与轮廓平行，自边缘切削去除精加工余量，直至切槽中心。此时，刀具半径补偿由循环自动选择并撤销选择。

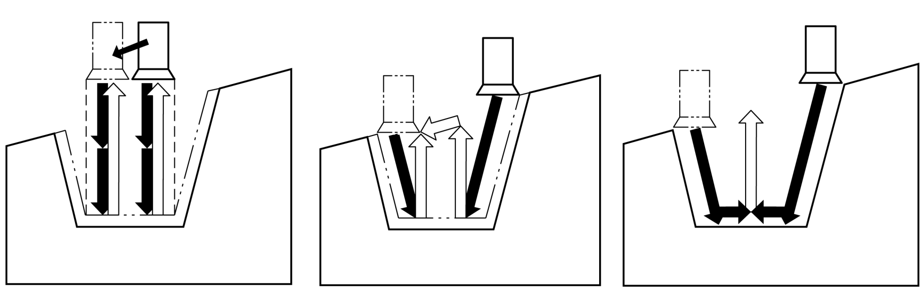


图 4-36　CYCLE93 工作过程示意

（5）示例　要求加工如图 4-37 所示槽。

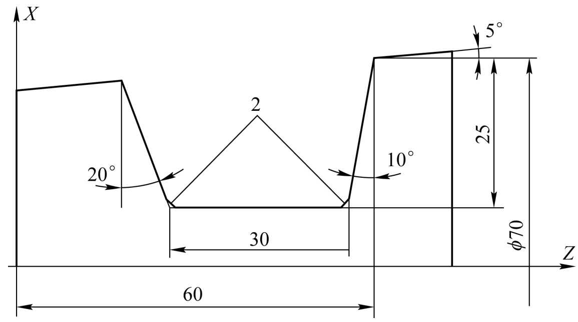


图 4-37　CYCLE93 应用示例

主程序

…

N100 T5 D1；　　选用切刀

N110 G96 S60 M4 F0.1；　　确定切削用量

N120 CYCLE93（70，60，30，25，5，10，20，0，0，−2，−2，0.1，0.1，6，0，5，0）；

起始点坐标为（70，60），槽底宽 30mm，深度 25mm，槽的倾斜角度为 5°，起始边斜度为 10°，终止边 20°，起始边及终止边槽顶无倒圆或倒角，起始边槽底倒角 2mm，终止边槽底倒角 2mm，槽底精加工余量 0.1mm，侧边余量 0.1mm，每次进刀深度 6mm，槽底不停留，加工类型为 5 号，每次进刀后退刀量系统默认为 1mm

N130 G0 X200 Z500；　　退刀

…

3. 螺纹车削循环

（1）功能　通过螺纹车削循环，可以在纵向轴和横向轴加工时以恒定螺矩加工圆柱形和锥形外螺纹和内螺纹。螺纹可以是单线螺纹，也可以是多线螺纹。对于多线螺纹，依次对各条螺线进行加工。

自动进刀时，可以每次选择不同的进刀量常数，也可以选择恒定的切削截面。

左旋螺纹或者右旋螺纹由主轴的旋向确定，这在循环调用之前必须指定。

在带有螺纹的程序段运行期间进给倍率无效。在加工螺纹期间，不允许更改主轴倍率。

（2）格式　CYCLE97（PIT，MPIT，SPL，FPL，DM1，DM2，APP，ROP，TDEP，FAL，IANG，NSP，NRC，NID，VARI，NUMT，_VRT）。CYCLE97 参数见表 4-10。

表 4-10　CYCLE97 参数

参　数	数据类型	含　义
PIT	实数	螺距（不输入符号）
MPIT	实数	米制粗牙螺纹的公称直径，范围 M3 ~60
SPL	实数	纵向轴上螺纹起始点
FPL	实数	纵向轴上螺纹终点
DM1	实数	起始点处螺纹的直径
DM2	实数	终点处螺纹的直径
APP	实数	导入位移（不输入符号）

（续）

参　　数	数据类型	含　　义
ROP	实数	收尾位移（不输入符号）
TDEP	实数	螺纹深度（单边深度，不输入符号）
FAL	实数	精加工余量（不输入符号）
IANG	实数	进给角度
NSP	整数	第一个螺纹导程的起始点偏移
NRC	整数	粗加工走刀次数（不输入符号）
NID	整数	空走刀次数（不输入符号）
VARI	整数	确定螺纹的加工方式（范围：1～4）
NUMT	整数	螺纹线数
_VRT	实数	超过起始直径的可变退刀位移，增量（不输入符号）

（3）含义　如图4-38所示，螺距（PIT）是一个轴向平行的值，规定其不带符号。加工米制圆柱螺纹时，也可以通过参数MPIT将螺矩规定为螺纹尺寸（M3～60）。应该有选择性地使用这两个参数。如果它们包含相互矛盾的值，则循环无法运行。

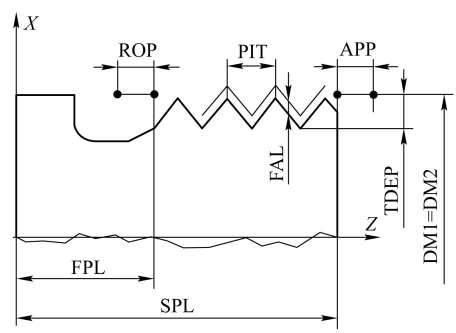


图4-38　CYCLE97部分参数示意

纵向轴上螺纹起始点（SPL）以及终点（FPL）描述了螺纹的原始出发点和终点的 Z 轴坐标。

螺纹直径（DM1、DM2）可以确定螺纹起始点和终点处螺纹直径。两参数不相等时即加工锥螺纹。加工内螺纹时，是底孔直径。

APP是起刀点至螺纹起始点轴向距离；ROP是退刀点至螺纹终点轴向间隔。这两个参数取值的大小取决于机床的加速性能和刀具切削螺纹时的进给速度。

由规定的螺纹深度TDEP，减去FAL设置的精加工余量，所剩下的余量分割为粗加工走刀（循环自行计算各个实际进刀深度，取决于参数VARI）。FAL设置的精加工余量一次加工完成。而NID设置的数据是无进刀深度的空走刀。因此，一条螺纹的整个走刀次数为：NRC＋NID＋1。

通过进给角度（IANG）可以确定螺纹中进刀的角度（图4-39）。

如果在螺纹中以垂直于切削方向的角度进刀，则必须将该参数值置零。如果沿着齿面进刀，则该参数绝对值最大允许为螺纹牙型角 ε 的一半。IANG为正值，表示每一次走刀总是沿着牙型的同一侧面进给。IANG为负值，表示沿着牙型的两个侧面交互进刀（IANG为负值的情况只适用于圆柱螺纹加工，在锥螺纹加工中，无论IANG为正或负，每一次走刀始终沿着牙型的同一侧面进给）。

螺纹导程的起始点偏移（NSP）可以对角度值编程，该角度值确定螺纹端面圆周上的第一条螺纹的切削点。这里与起始点偏移位置有关。参数取值的范围可以为0.0001～＋359.9999度。如果没有给定起始点偏移位置或者在参数列表中省略了该参数，则第一个螺纹导程自动在零度标记处开始。

加工方式（VARI）用来确定是否采用外加工或内加工，以及在粗加工涉及进刀时采用

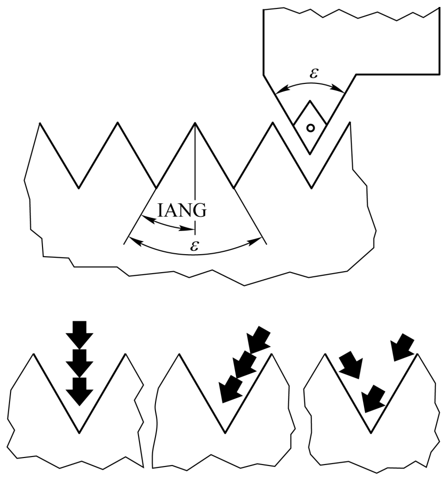
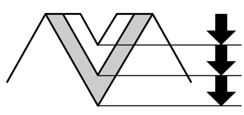


图 4-39　进给角度示意

何种工艺进行加工。参数 VARI 可以采用 1 ~4 之间的数值，其含义分别如图 4-40 所示。



VARI 取值	外部/内部	恒定进刀深度/恒定切削面积
1	外部	恒定进刀深度
2	内部	恒定进刀深度
3	外部	恒定切削面积
4	内部	恒定切削面积

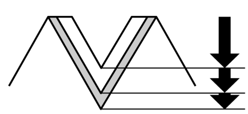


图 4-40　加工方式示意

恒定切削面积是指在分解进刀中待加工的螺纹深度时，通过恒定的切削面积使所有粗加工切削时的切削压力保持恒定。然后以不同的进刀深度值进行进刀，该工艺可以获得更好的切削条件。

恒定进刀深度是以唯一的进刀深度分配整个螺纹深度。此时，切削面积一次比一次大。

NUMT 用来指定多线螺纹的螺纹线数。对于单线螺纹，将该参数置零或者可以在参数列表中省略。螺纹导程可以均匀地分布在车削件圆周上，第一条螺纹位置由参数 NSP 确定，如图 4-41 所示。

退刀位移（_VRT）可以指定一个退刀量，粗加工时在两个轴上退刀。_VRT＝0（参数未编程）时，退刀位移为 1mm。退刀位移总是与编程的尺寸系统（寸制或者米制）相关。

（4）工作过程　该循环产生以下的运动过程：

使用 G0 快速定位到循环内部计算的起始点，在第一个螺纹导程导入位移的开始处，根据 VARI 所指定的加工方式进行进刀（粗加工）。根据粗加工走刀步数重复螺纹切削。然后，切削精加工余量，并根据空走刀步数重复切削。

对于多线螺纹的其他螺纹，重复整个运行过程。

（5）示例　加工如图4-42所示的螺纹，参数为M42×2，螺纹深度TDEP＝0.613435×2≈1.23mm。

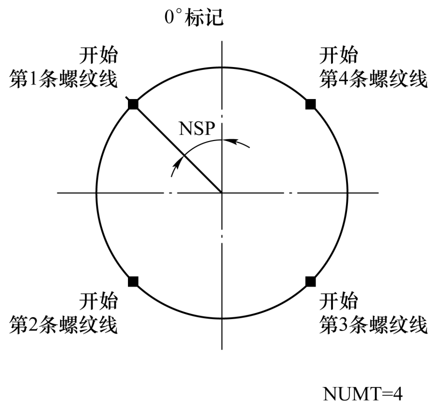


图4-41　NSP、NUMT示意

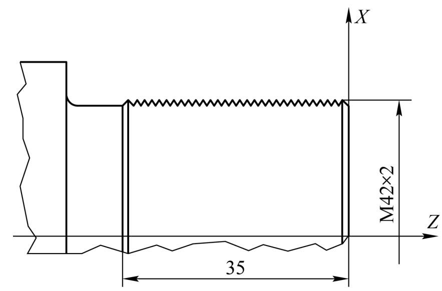


图4-42　CYCLE97应用示例

主程序

…

N100 T7 D1；　　　　　　　　选择刀具

N110 G97 S400 M3；　　　　　确定主轴转速及转向，右旋螺纹主轴应正转

N120 CYCLE97（2，0，0，－35，42，42，3，3，1.23，0.1，－30，0，5，1，3，1，1）；

螺纹导程为2mm，是非米制粗牙螺纹，MPIT＝0，螺纹从Z0到Z－35，导入位移和收尾位移均为3mm，螺纹单边深度1.23mm，精加工余量0.1mm，两侧边交错进刀，单线螺纹，粗车次数为5次，精车后空进刀1次，恒定切削面积方式加工外螺纹，退刀位移为1mm

N130 G0 X200 Z500；　　　　　　退刀

…

4.4.4　典型数控车床编程综合实例

要加工如图4-43所示工件，毛坯为ϕ36mm棒材，材料为45钢。

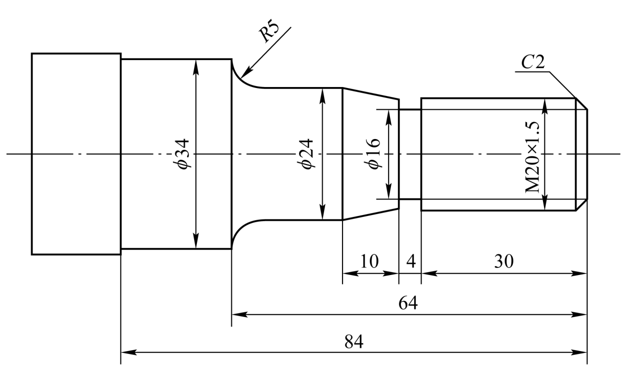


图4-43　SINUMERIK 840D数控车削编程实例

1. 零件图工艺分析

该零件表面由圆柱、圆锥、顺圆弧以及螺纹等表面组成，图样尺寸标准完整，轮廓描述

清楚，完全可以计算出各基点坐标。

通过上述分析，可以采取以下工艺措施：工件毛坯为 ϕ36mm 的 45 钢棒材，强度足够，直接采用自定心卡盘装夹。为便于平整端面，不用机床顶尖，同时为保证能完全加工此工件，卡盘外毛坯长度为 101mm。加工时从右向左进行轮廓车削，为提高工件精度，轮廓车削分为粗车和精车两个工序。另外还有螺纹和退刀槽，因此加工的工艺顺序为：平端面→粗车轮廓→精车轮廓→车削退刀槽→车削螺纹。根据工艺顺序，采用的刀具有：粗车外圆刀（T1）、精车外圆刀（T3）、切槽刀（T5）、外螺纹刀（T7）。

SINUMERIK 840D 数控系统具有轮廓车削循环、切槽循环和螺纹车削循环，只要正确使用各个固定循环，系统可以自行确定其轮廓粗、精加工路线，切槽路线和螺纹加工路线，不需要人为干预。

2. 程序示例

为便于对刀和编程方便，以工件右端面圆心为工件坐标系原点。通过计算得出各基点坐标如下：

A(15.8，0) B(19.8，−2) C(19.8，−30) D(20，−34) E（24，−44) F(24，−59) G(34，−64) H(34，−84) I(36，−84)

主程序

```
A01.MPF
N010 G54;
N020 TRANS Z100;
N030 T1 D1;
N040 G96 S100 M4 F0.1;
N050 G0 X38 Z0;
N060 G1 X-1;
N070 G0 X38 Z2;
N080 CYCLE95 ("L01", 3, 0.1, 0.5, 0, 0.1, 0.05, 0, 1, 0, 0, 1);
N090 G0 X200 Z400;
N100 T3 D1;
N110 G96 S120 M4 F0.07;
N120 CYCLE95 ("L01", 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.07, 5, 0, 0, 1);
N130 G0 X200 Z400;
N140 T5 D1;
N150 G96 S80 M4 F0.1;
N160 CYCLE93 (20, -30, 4, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 2, 0, 5, 0);
N170 G0 X200 Z400;
N180 T7 D1;
N160 G97 S500 M3;
N170 CYCLE97 (1.5, 0, 0, -30, 20, 20, 2, 2, 0.92, 0.1, -30, 0, 4, 1, 3, 1, 0);
N180 G0 X200 Z400;
N190 M30;
```

子程序

```
L01.SPF
N010 G1 X15.8 Z0;
N020 X19.8 Z-2;
N030 Z-34;
N040 X20;
N050 X24 Z-44;
N060 Z-59;
N070 G2 X34 Z-64 CR=5;
N080 G1 Z-84;
N090 X36;
N100 M17;
```

【知识拓展】

数控车床加工工艺性能广泛，在螺纹、斜齿圆柱齿轮、蜗杆、槽等复杂工件的加工过程中优势很明显。提高数控车床的效率可以依靠合理运用编程技巧，例如，灵活设置参考点、化零为整法、减少刀具空行程或优化参数，从而平衡刀具负载，减少刀具磨损等。

在数控车床生产中经常会遇到非圆类标准曲线的加工，如双曲线、抛物线、正余弦、椭圆。数控系统没有这类曲线的直接编程插补指令，直接编程难以完成，需要使用计算机自动编程或者利用宏程序手工编程。采用自动编程所生成的程序繁琐，一旦有误很难找出存在问题的地方。利用宏程序手工编程时，对于一些不规则零件，可近似进行线性分割。这样我们可以用直线廓形代替曲线形成零件的廓形。通过建立准确的数学模型，合理的变量赋值，设定有效的循环变量，从而编制出简洁的宏程序。

【本章小结】

本章以数控车床编程为主，有针对性地描述了数控车床的基本结构、工作性能和加工特点，分析了刀具的种类、使用范围，并结合实例对数控车削加工工艺的编制流程、方法、做了详细阐述。

通过本章的学习，我们应当明确数控车床的编程特点：

1）编写车削零件换刀时的安全位置。车刀在刀架上安装时伸出的长短不一，而在换刀时有可能发生工件与刀具的相互干涉，造成刀具或工件的损坏，因此，在编写程序时一定要先写出安全换刀点位置的程序段。

2）在一程序段中，绝对值编程或增量值编程使用不同的命令，可以混合使用。车刀的刀位点在刀尖上，编程时认为它是一个点。

3）进刀和退刀方式。对于车削加工，进退刀时采用快速走刀，以减少走刀时间，提高加工效率。车削起点的确定与工件毛坯余量大小有关，同时考虑刀具半径补偿。应以刀具快速走到该点时刀尖不与工件发生碰撞为原则。

4）为了保证车削后表面粗糙度一致和提高生产率可采用恒线速度切削加工。主要涉及2个指令：G96 S，G97 S。

5）当毛坯余量较大时，用车床系统的固定循环指令可简化编程。

思考题与习题

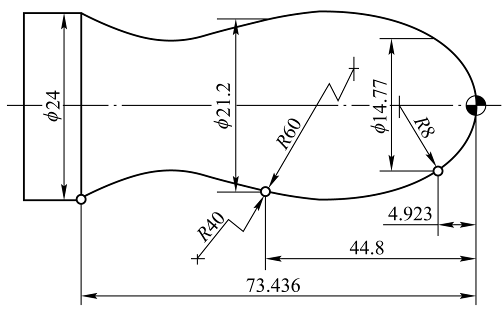
4-1　简述数控车床的组成部分及其作用。

4-2　试说明数控车床适合加工哪些类型的工件。

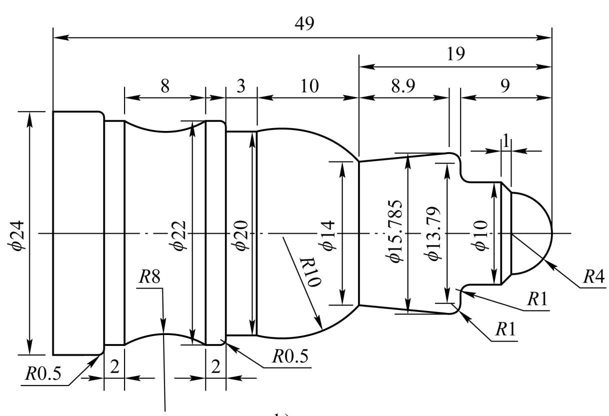
4-3　确定数控车床加工路线的原则有哪些?

4-4　简述数控车床工件坐标系和机床坐标系的关系。

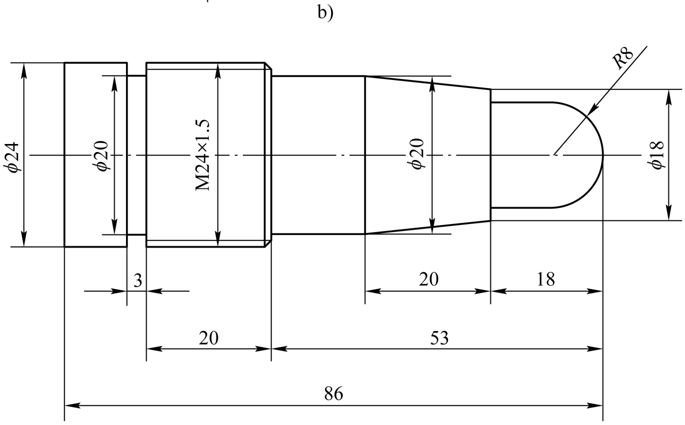
4-5　编写图 4-44 所示四张图样的数控加工程序。



a)

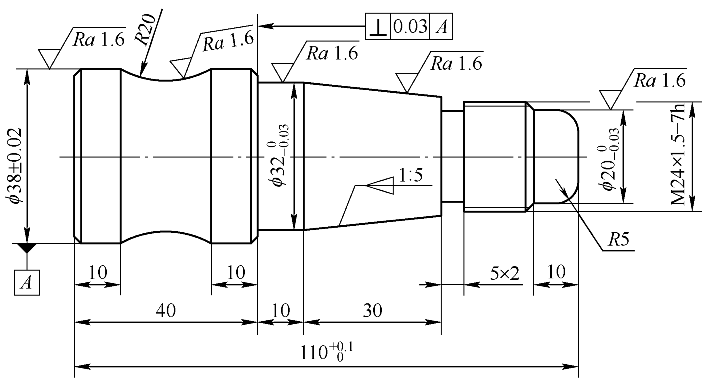


b)



c)

图 4-44　习题 4-5


Ra 1.6
R20
Ra 1.6
⊥ 0.03 A
Ra 1.6
Ra 1.6
Ra 1.6
φ38±0.02
φ32 0 -0.03
1:5
φ20 0 -0.03
M24×1.5−7h
R5
A
10
10
5×2
10
40
10
30
110 +0.1 0

d)

图4-44　习题4-5（续）

第 5 章　数控铣削编程

【知识要点】

1. 数控铣床的分类和机械结构。
2. 数控铣床（加工中心）刀具系统。
3. 数控铣削（加工中心）加工工艺。
4. 数控铣床及加工中心编程的特点。

5.1　数控铣削概述

数控铣削是机械加工中最常用的数控加工方法之一，除了能铣削普通铣床所能铣削的各种零件表面外，还能铣削普通铣床不能铣削的需要 2～5 坐标联动的各种平面轮廓和立体轮廓。

数控铣削使用的是数控铣床或者数控加工中心。数控铣床是指在普通铣床上集成了数字控制系统，可以在程序代码的控制下较精确地进行铣削加工的机床。加工中心是从数控铣床发展而来的，与数控铣床的最大区别在于数控加工中心具有自动交换加工刀具的能力，通过在刀库上安装不同用途的刀具，可在一次装夹中通过自动换刀装置改变主轴上的加工刀具，实现铣削、镗削、钻削、攻螺纹和切削螺纹等多种加工功能。因此数控加工中心综合加工能力较强，工件一次装夹后能完成较多的加工内容，加工精度较高。就中等加工难度的大批量工件，其效率是普通设备的 5～10 倍，特别是它能完成许多普通设备不能完成的加工，对形状较复杂，精度要求高的单件加工或中小批量多品种生产更为适用。

随着现代数控技术的发展，数控铣床的功能也日趋强大，数控铣床和数控加工中心的区别越来越小。本章以 SINUMERIK 840D 系统数控铣削编程为例，该系统同时兼顾了数控铣床和数控加工中心的编程。

5.1.1　数控铣床的分类

数控铣床的分类方法很多，一般有以下几种分类方法：

1. 按主轴布置形式分类

按机床主轴的布置形式分类，可分为数控立式铣床、数控卧式铣床和数控立卧两用铣床。

（1）数控立式铣床　数控立式铣床一般可进行三坐标联动加工，目前三坐标数控立式铣床占大多数。如图 5-1 所示，数控立式铣床主轴与机床工作台面垂直，工件装夹方便，加工时便于观察，一般采用固定式立柱结构，工作台不升降。主轴箱上下运动，并通过立柱内的重锤平衡主轴箱的质量。为保证机床的刚性，主轴中心线距立柱导轨面的距离不能太大，因此，这种结构主要用于中小尺寸的数控铣床。

数控立式铣床一般为 2.5 轴或者 3 轴联动，也可以附加数控转盘，采用自动交换台，增

加靠模装置来扩大它的功能、加工范围及加工对象，进一步提高生产效率。但是还有机床主轴可以绕 X、Y、Z 坐标轴中其中一个或两个做回转运动的四坐标和五坐标数控立式铣床，通常，机床控制的坐标轴越多，尤其是要求联动的坐标轴越多，机床的功能、加工范围及可选择的加工对象也越多，如果具有自动交换加工刀具的能力，就可以称之为数控立式加工中心，如图 5-2 所示。但随之而来的就是机床结构更加复杂，对数控系统的要求更高，编程难度更大，设备的价格也更高。



图 5-1　数控立式铣床



图 5-2　数控立式加工中心

（2）数控卧式铣床　数控卧式铣床与通用卧式铣床相同，其主轴轴线平行于水平面。如图 5-3 所示，数控卧式铣床的主轴与机床工作台面平行，加工时不便于观察，但排屑顺畅。为了扩大加工范围和扩充功能，有的数控卧式铣床配有数控回转工作台或万能数控转盘来实现四坐标、五坐标加工，这样不但工件侧面上的连续轮廓可以加工出来，而且可以实现在一次安装过程中，通过转盘改变工位，进行“四面加工”。尤其是万能数控转盘可以把工件上各种不同角度的加工面摆成水平来加工，这样可以省去很多专用夹具或专用角度的成形铣刀。虽然数控卧式铣床在增加了数控转盘后很容易做到对工件进行“四面加工”，使其加工范围更加广泛，但从制造成本上考虑，单纯的数控卧式铣床现在已比较少，而多是在配备自动换刀装置（ATC）后成为数控卧式加工中心，如图 5-4 所示。

（3）数控立卧两用铣床　数控立卧两用铣床由于主轴方向可以更换，能达到在一台机床上既可以进行立式加工，又可以进行卧式加工，而同时具备了上述两类机床的功能。其使用范围更广，功能更全，选择加工对象的余地更大，且给用户带来不少方便。特别是生产批量小，品种较多，又需要立、卧两种方式加工时，用户只需买一台这样的机床就行了（图 5-5）。

2. *按数控铣床工作台形式分类*

（1）工作台升降式数控铣床　其特点为工作台移动、升降，而主轴不动。小型数控铣床一般采用此种方式。

（2）主轴头升降式数控铣床　其特点为工作台纵向和横向移动，且主轴沿垂向溜板上下运动。主轴头升降式数控铣床在精度保持、承载重量、系统构成等方面具有很多优点，已成为数控铣床的主流。



图 5-3　数控卧式铣床

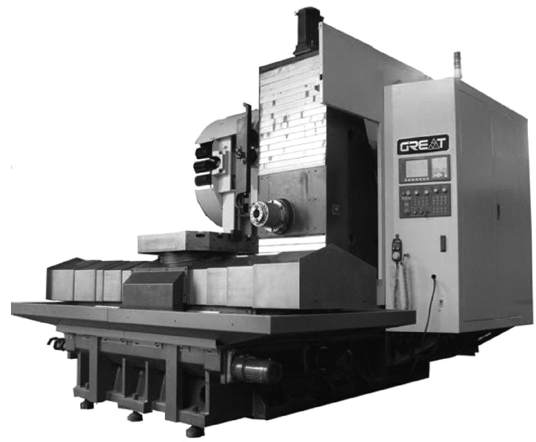


图 5-4　数控卧式加工中心

(3) 龙门式数控铣床　其特点为铣床主轴能够在龙门架的横向与垂向溜板上运动，而龙门架固定或者沿床身作纵向运动。一般用于大型数控铣床。



图 5-5　立卧两用数控铣床

5.1.2　数控铣床的组成和机械结构

1. 数控铣床的组成

数控铣床形式多样，不同类型的数控铣床在组成和机械结构上虽有所差别，但却有许多相似之处。一般数控铣床由数控系统、伺服系统和机床主体三个基本部分组成。

(1) 数控系统　数控系统是数控铣床的核心，主要作用是对输入的加工程序进行数字运算和逻辑运算，然后向伺服控制系统发出控制信号。现代的数控系统是一种专用计算机，由硬件和软件组成。有的数控系统就是将 PC 机配以控制软件而构成的。

(2) 伺服系统　伺服系统的基本作用是接收数控系统发来的指令脉冲信号，控制机床执行机构的进给速度、方向和位移量，以完成零件的自动加工。伺服系统是由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成，是数控系统的执行部件。

(3) 机床本体　机床本体就是数控铣床的机械结构。除铣床基础部件外，由下列部分组成：①主传动系统；②进给传动系统；③工件回转、定位装置和附件；④实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置，如液压、气动、润滑、冷却等系统和排屑、防护等装置。而铣床基础件称为铣床大件，通常是指床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台等，它是整台铣床的基础和框架。铣床的其他零部件，或者固定在基础件上，或者工作时在它的导轨上运动。其他机械结构则按铣床的功能需要选用。

2. 数控铣床的机械结构

(1) 主传动系统　数控机床主传动系统是指驱动主轴运动的系统。主轴是数控机床上带动刀具旋转，产生切削运动的运动轴，它往往是数控机床上单轴功率消耗最大的运动轴。

与普通机床一样数控机床也必须通过变速，才能使主轴获得不同的转速，以适应不同的加工要求。在变速的同时，还要求传递一定的功率和足够的转矩，满足切削的需要。

1）数控机床主传动系统的变速方式主要有：有级变速（机械变速），有级变速仅用于经济型数控机床，大多数数控机床均采用无级变速或分段无级变速；无级变速，主传动采用无级变速，不仅能在一定的速度范围内选择到合理的切削速度，而且还能在运动中自动换速；分段无级变速，为了保证数控机床主轴低速时有较大的转矩和主轴的变速范围尽可能大，有的数控系统在交流或直流电动机无级变速的基础上配以齿轮变速，使之成为分段无级变速；内置电动机主轴变速（电主轴）。电主轴的出现大大简化了主运动系统结构，实现了所谓的“零传动”，它具有结构紧凑、重量轻、惯性小、动态特性好等优点，并可改善机床的动平衡，避免振动和噪声，在超高速切削机床上得到了广泛的应用。

2）主轴准停装置。在数控铣床和以镗铣为主的加工中心上，为了实现自动换刀，使机械手准确地将刀具装入主轴孔中，刀具的键槽必须与主轴的键位在周向对准；镗削加工退刀时，要求刀具向刀尖反方向径向移动一段距离后才能退出，以免划伤工件，这都需要主轴具有周向定位功能。

另外，一些特殊工艺要求，如在通过前壁小孔镗内壁的同轴大孔，或进行反倒角等加工时，也要求主轴实现准停，所以在主轴上必须设有准停装置。

准停装置分机械式（图 5-6）和电气式（图 5-7）两种。

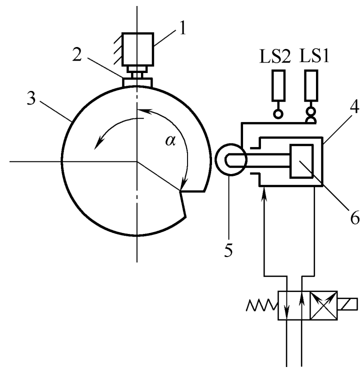


图 5-6　机械式主轴准停装置

1—无触点开关　2—感应块

3—V 形槽轮定位盘　4—定位液压缸

5—定向滚轮　6—定向活塞

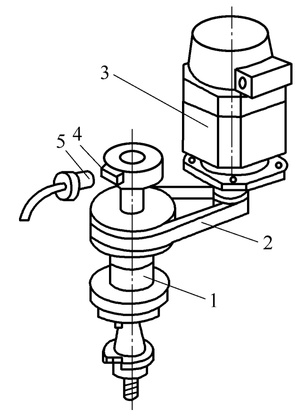


图 5-7　电气式主轴准停装置

1—主轴　2—带　3—电动机

4—永久磁铁　5—磁传感器

机械准停装置的工作原理如下：在主轴固定一个 V 形槽轮定位盘 3，当接收到主轴准停指令后，主轴电动机以低速转动，主轴箱内齿轮换挡使主轴以低速旋转，时间继电器开始动作，并延时 4 ~6s，保证主轴稳定后接通无触点开关 1 的电源，当主轴转到图 5-6 所示位置即 V 形槽轮定位盘 3 上的感应块 2 与无触点开关 1 相接触后发出信号，使主轴电动机停转。另一延时继电器延时 0.2 ~0.4s 后，液压油进入定位液压缸下腔，使定向活塞向左移动，当定向活塞上的定向滚轮 5 顶入定位盘的凹槽内时，行程开关 LS2 发出信号，主轴准停完成。若延时继电器延时 1s 后行程开关 LS2 仍不发信号，说明准停没完成，需使定向活塞 6 后退，

重新准停。当活塞杆向右移到位时，行程开关 LS1 发出定向滚轮 5 退出凸轮定位盘凹槽的信号，此时主轴可起动工作。

机械准停装置比较准确可靠，但结构较复杂。现代的数控铣床一般都采用电气式主轴准停装置，只要数控系统发出指令信号主轴就可以准确地定向。常用磁力传感器检测定向的工作原理如图 5-7 所示是在主轴上安装有一个永久磁铁 4 与主轴一起旋转，在距离永久磁铁 4 旋转轨迹外 1 ~ 2mm 处固定有一个磁传感器 5，当铣床主轴需要停车换刀时，数控装置发出主轴停转的指令，主轴电动机 3 立即降速，使主轴以很低的转速回转，当永久磁铁 4 对准磁传感器 5 时，磁传感器发出准停信号，此信号经放大后，由定向电路使电动机准确地停止在规定的周向位置上。这种准停装置机械结构简单，发磁体与磁传感器间没有接触摩擦，准停的定位精度可达 ±1°，能满足一般换刀要求，而且定向时间短，可靠性较高。

3）主轴自动装卸及吹屑装置。在加工中心上，为了实现刀具在主轴上的自动装卸，除了要保证刀具在主轴上正确定位之外，还必须设计自动夹紧装置及吹屑装置。

如图 5-8 所示为某加工中心主轴结构部件图，其刀具可以在主轴上自动装卸并进行自动夹紧，也可完成吹屑动作。其工作原理为：当刀具 2 装到主轴孔后，其刀柄后部的拉钉 3 便被送到主轴拉杆 7 的前端，在碟形弹簧 9 的作用下，通过弹性卡爪 5 将刀具拉紧。当需要换刀时，电气控制指令给液压系统发出信号，使液压缸 14 的活塞左移，带动推杆 13 向左移动，推动固定在拉杆 7 上的轴套 10，使整个拉杆 7 向左移动，当弹性卡爪 5 向前伸出一段间隔后，在弹性力作用下，弹性卡爪 5 自动松开拉销 3，此时拉杆 7 继续向左移动，喷气嘴 6 的端部把刀具顶松，机械手便可把刀具取出进行换刀。装刀之前，压缩空气从喷气嘴 6 中喷出，吹掉锥孔内脏物，当机械手把刀具装进之后，液压油通入液压缸 14 的左腔，使推杆退回原处，在碟形弹簧的作用下，通过拉杆 7 又把刀具拉紧。切削液喷嘴 1 用来在切削时对刀具进行大流量冷却。

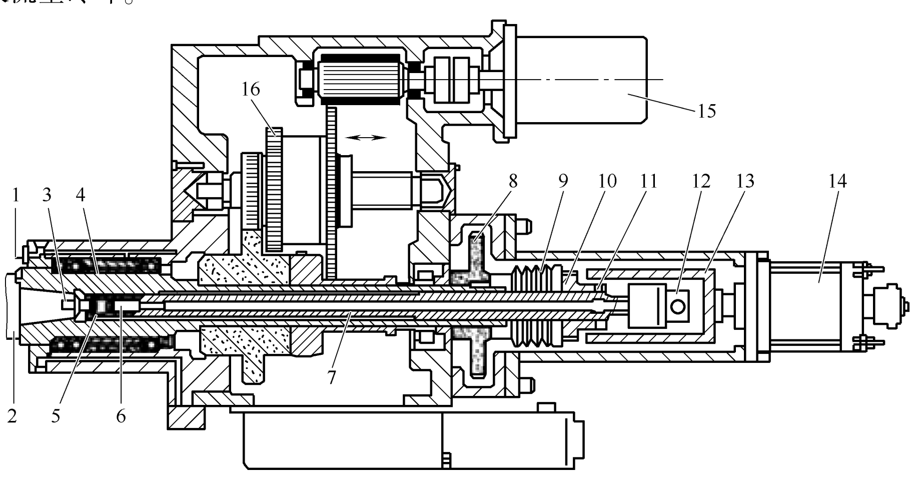
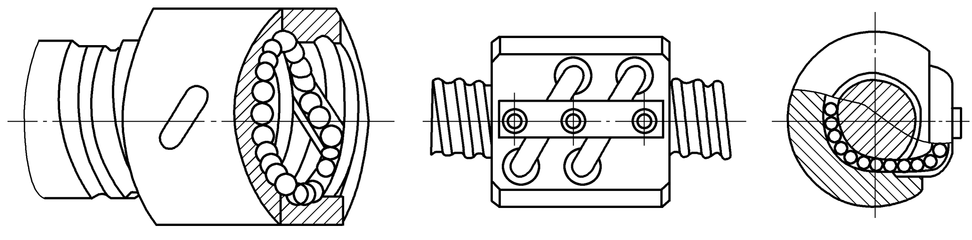


图 5-8　某加工中心主轴结构

1—切削液喷嘴　2—刀具　3—拉销　4—主轴　5—弹性卡爪　6—喷气嘴　7—拉杆
8—定位凸轮　9—碟形弹簧　10—轴套　11—固定螺母　12—旋转接头　13—推杆　14—液压缸
15—交流伺服电动机　16—换档齿轮

（2）进给传动系统　数控机床进给运动时数字控制的直接对象。数控机床进给传动系统的精度、灵敏度和稳定性，将直接影响零件的加工精度。进给传动系统主要由传动机构、运动变换机构、导向机构、执行件组成。常用的传动机构有滚珠丝杠螺母副、静压丝杠螺母副和齿轮传动副等。常用导向机构有塑料滑动导轨、滚动导轨和静压导轨。

1）滚珠丝杠副。滚珠丝杠副由丝杠、螺母、滚珠和滚珠返回装置四部分组成。按照滚珠的循环方式，滚珠丝杠副分成内循环方式和外循环方式两大类。



a)　　b)

图 5-9　滚珠丝杠副的循环方式

a）内循环　b）外循环

外循环的滚珠循环时与丝杠脱离接触，由端部弯管引导滚珠通过弧形铜管形成返回通道，工作圈数一般为 2.5 圈或 3.5 圈，尺寸较大。内循环滚珠在循环过程中始终与丝杠保持接触，采用圆柱凸键反向器实现滚珠循环，反向器嵌入螺母内，工作圈数一般为 3 列，尺寸较小。

滚珠丝杠副的特点：

① 传动效率高、摩擦损失小。滚珠丝杠副的传动效率 $\eta = 0.92 \sim 0.96$，可实现高速运动。

② 运动灵敏，低速时无爬行。由于摩擦因数小，动、静摩擦因数之差极小，故运动平稳，不易出现爬行现象。

③ 传动精度高，刚性好，反向时无空行程。滚珠丝杠副经预紧后，可消除轴向间隙。

④ 滚珠丝杠副的磨损很小，使用寿命长。

⑤ 无自锁能力，具有传动的可逆性，故对于垂直使用的丝杠，由于重力的作用，当传动切断时不能立即停止运动，应增加自锁装置。

⑥ 滚珠丝杠副制造工艺复杂，滚珠丝杠和螺母的材料，热处理和加工要求与滚动轴承相同，且螺旋滚道必须磨削，因而制造成本高。

滚珠丝杠副对轴向间隙有严格的要求，以保证反向时的运动精度。所谓反向间隙是指丝杠和螺母无相对转动时，丝杠和螺母之间的最大轴向窜动。因此，为了把轴向窜动完全消除，通常采用双螺母预紧的方法，其结构形式有以下三种：

a. 用锁紧螺母预紧。如图 5-10 所示为利用锁紧螺母来调整间隙实现预紧的结构。滚珠丝杠两端以平键与外套相连，其中右端的外延伸没有凸缘并制有螺纹。用两个圆螺母 1、2 可使右端盖相对于丝杠做轴向移动，在消除间隙后锁紧。这种方式结构紧凑、调整方便，因此应用广泛，但是调整位移量不易精确控制。

b. 修磨垫片调间隙。如图 5-11 所示，通过修磨垫片的厚度，使滚珠丝杠的左右端盖产生轴向位移，实现预紧。这种方式结构简单，刚性好，调整间隙时需卸下调整垫片修磨，为

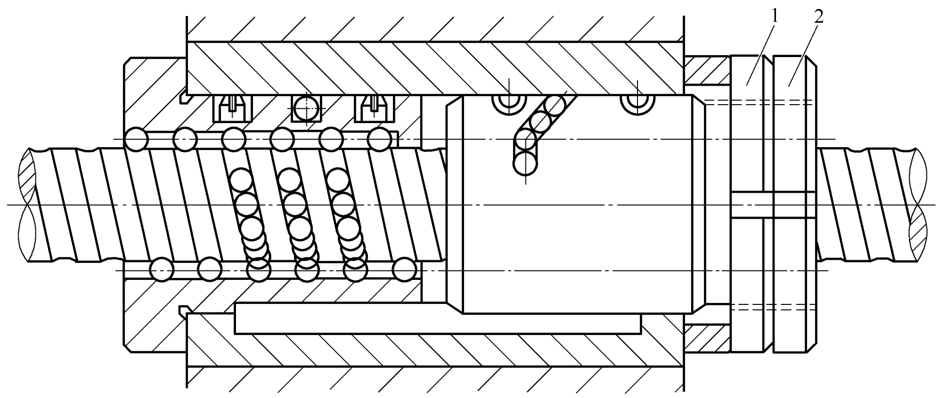


图 5-10　锁紧螺母预紧滚珠丝杠螺母副

1—圆螺母　2—锁紧螺母

了装卸方便，最好将调整垫片做成半环结构。

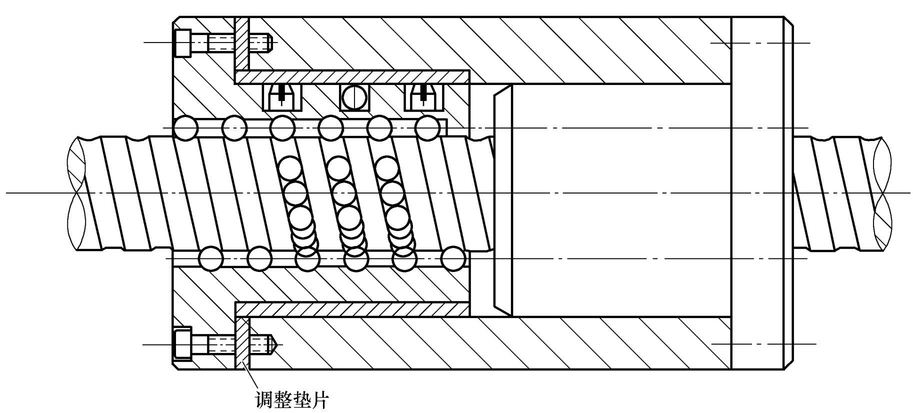


图 5-11　修磨垫片预紧滚珠丝杠螺母副

c. 齿差式调整。如图 5-12 所示为齿差式调整间隙结构。在左右端盖部做出外齿轮，齿数分别为 z_1、z_2，而且 z_1 和 z_2 相差一个齿。并分别与两端相应的内齿圈啮合，且因端盖与套筒以螺纹连接。当使两个端盖同向转动相同的齿数时，两端盖的轴向相对位置发生变化，从而实现间隙的调整和施加预紧力。

这种方法使两螺母相对位移量可以达到较小的数值，其调整精度高，调整准确可靠，但结构复杂。

2）齿轮传动副。数控铣床进给传动系统中常采用齿轮传动副来达到一定的降速比和转矩的要求。一对啮合的齿轮总有一定的齿侧间隙才能正常工作。齿侧间隙会造成进给系统的反向动作落后于数控系统的要求，形成跟随误差甚至是轮廓误差，因此，必须消除齿轮传动副中的齿侧间隙。

不同类型的齿轮传动副消除齿侧间隙的方法不同，圆柱齿轮传动消除齿侧间隙的方法有偏心轴套调整法、锥度齿轮调整法、双片齿轮错齿调整法，斜齿轮传动消除齿侧间隙的方法有轴向垫片调整法、轴向压簧调整法。

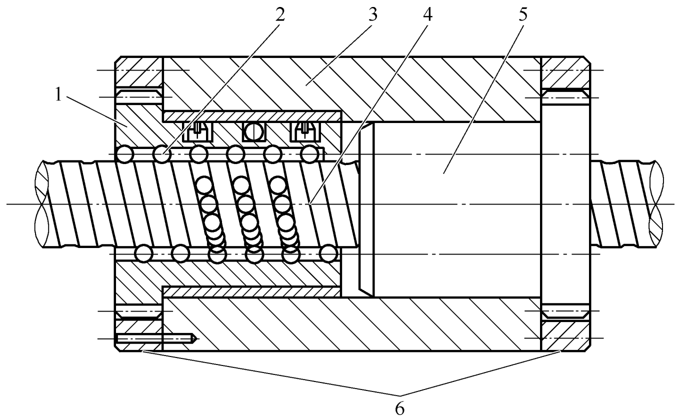


图 5-12 齿差式调整滚珠丝杠螺母副

1、5—端盖 2—滚珠 3—套筒 4—丝杠 6—内齿圈

① 偏心轴套调整法。如图 5-13 所示，齿轮 1 装在电动机轴上，调整偏心轴套 2 可以改变齿轮 1 和 3 之间的中心距，从而消除齿侧间隙。

② 锥度齿轮调整法。如图 5-14 所示，将一对齿轮 1 和 2 的轮齿沿轮齿宽方向制成小锥度，使齿厚在齿轮的轴向稍有变化。调整改变垫片 3 的厚度就可改变齿轮 1 和 2 的轴向相对位置，从而消除间隙。

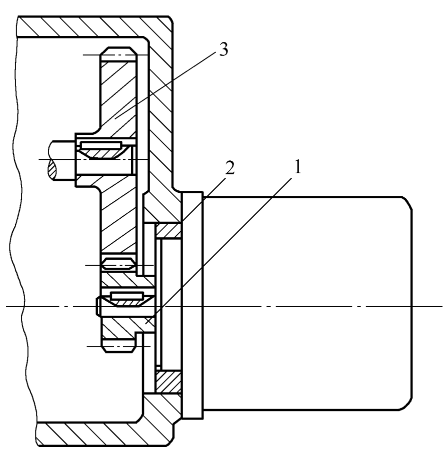


图 5-13 偏心轴套调整法

1、3—齿轮 2—偏心轴套

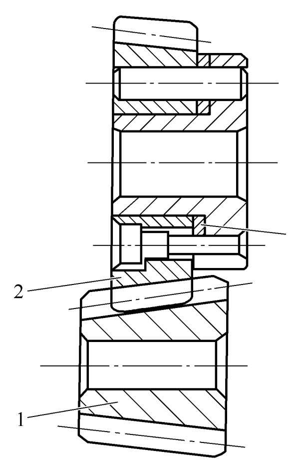


图 5-14 锥度齿轮调整法

1、2—齿轮 3—垫片

③ 双片齿轮错齿调整法。如图 5-15 所示，双片齿轮错齿调整法就是两个相同齿数的薄片齿轮 1 和 2 与另一个宽齿轮啮合，两薄片齿轮可相对回转。在两个薄片齿轮 1 和 2 的端面均匀分布着 4 个螺孔，分别装上凸耳 3 和 8，齿轮 1 的端面还有另外 4 个通孔，凸耳可以在其中穿过，弹簧 4 的两端分别钩在凸耳 3 和调节螺钉 7 上。通过螺母 5 调节弹簧 4 的拉力，调节完后用螺母 6 锁紧。弹簧的拉力使薄片齿轮错位，即两个薄齿轮的左右齿面分别贴在宽齿轮齿槽的左右齿面上，从而消除了齿侧间隙。

④ 斜齿轮传动消除间隙方法。斜齿轮传动消除间隙方法与直齿圆柱齿轮传动中双片齿

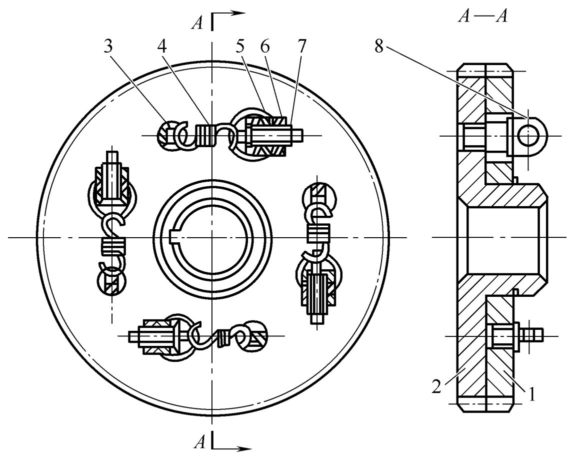


图 5-15　双片齿轮错齿调整法
1、2—薄片齿轮　3、8—凸耳　4—弹簧
5、6—螺母　7—调节螺钉

轮错齿调整法消除间隙的思路相似，也是用两个薄片齿轮和一个宽齿轮啮合，只是通过不同的方法使两个薄片齿轮沿轴向移动合适的距离，相当于两薄片斜齿圆柱齿轮的螺旋线错开了一定的角度。两个齿轮与宽齿轮啮合时分别负责不同的方向，起到消除间隙的作用。

3）导轨。导轨作为机床导向机构，对机床的刚度、加工精度和使用寿命具有很大的影响，作为机床进给系统的重要环节，数控机床的导轨比普通机床的导轨要求更高。现代数控机床采用的导轨主要有塑料滑动导轨、滚动导轨和静压导轨。

① 数控机床对导轨的基本要求。导向精度高，导向精度主要是指运动部件沿导轨运动时的直线度或圆度。足够的刚度，导轨要有足够的刚度，保证在静载荷作用下不产生过大的变形，从而保证各部件间的相对位置和导向精度。良好的摩擦特性，动导轨沿支承导轨面长期运行会引起导轨的不均匀磨损，破坏导轨的导向精度，从而影响机床的加工精度。低速运动的平稳性。进给运动的爬行，会降低工件精度，故要求导轨低速运动平稳，不产生爬行，这对高精度机床尤其重要。阻尼特性好（高速时不振动）。结构工艺性好。

② 塑料滑动导轨。塑料滑动导轨摩擦因数低，且动、静摩擦因数差值小；减振性好，具有良好的阻尼性；耐磨性好，有自润滑功能；结构简单、维修方便、成本低。

塑料滑动导轨分为注塑导轨和贴塑导轨，导轨上的塑料常采用聚四氟乙烯导轨软带和环氧树脂耐磨涂料（图 5-16、图 5-17）。

③ 滚动导轨。滚动导轨在导轨工作面之间安排动件，使两导轨面之间形成滚动摩擦。滚动导轨的特点：摩擦因数小，动、静摩擦因数差别小。其起动阻力小，能微量准确移动，低速运动平稳，无爬行，因而运动灵活，定位精度高，寿命长，是适合数控机床进给系统应用的比较理想的导轨元件。但刚度和抗振性比滑动导轨差，必须通过预紧提高刚度和抗振性，才能承受较大的冲击和振动。

常用的滚动导轨有滚动导轨块和直线滚动导轨两种。滚动导轨块是一种圆柱滚动体作循环运动的标准结构导轨元件，其结构如图 5-18 所示。特点是刚度高，承载能力大，便于拆

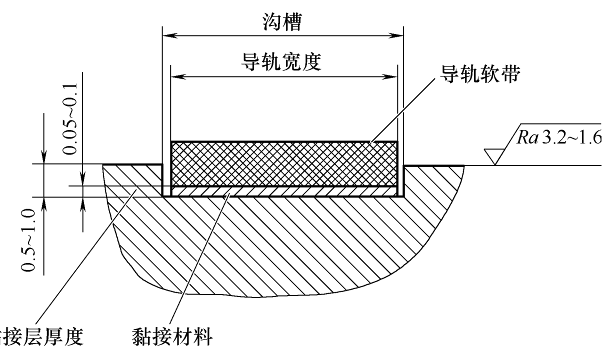


图 5-16　塑料导轨的黏接

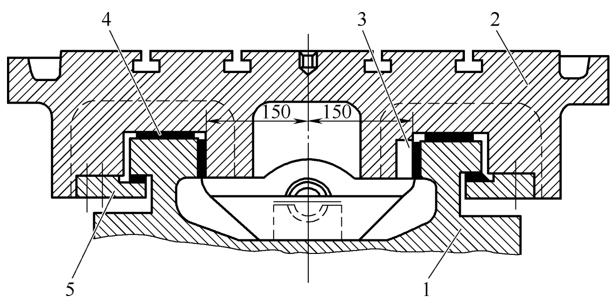


图 5-17　塑料导轨在机床上的应用形式

1—床身　2—工作台　3—镶条　4—导轨软带　5—下压板

装，它的行程取决于支承件导轨平面的长度。缺点是导轨制造成本高，抗振性能欠佳。直线滚动导轨结构主要由支承块、导轨、滚珠、保持架、密封板等组成（图 5-19）。由于它将支承块和运动导轨组合在一起，作为独立的标准导轨副部件由专门生产厂家制造，故又称单元式滚动导轨。

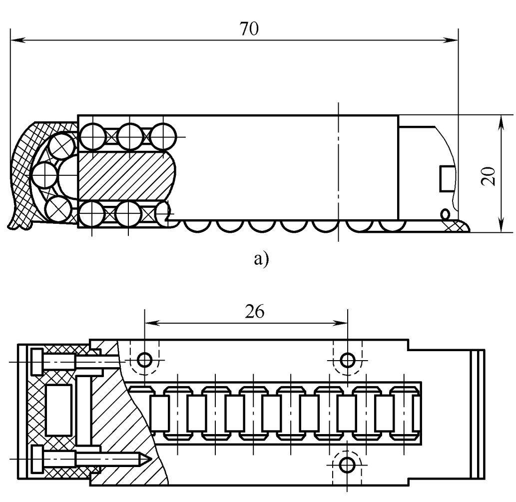


图 5-18　滚动导轨块的结构

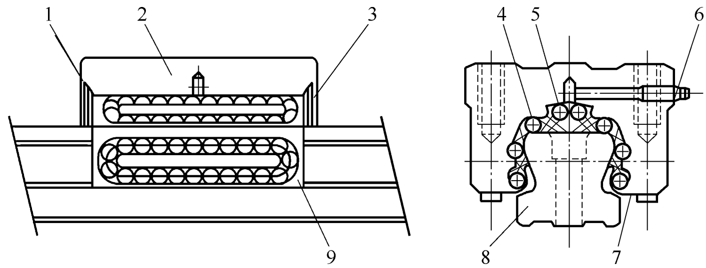


图 5-19　直线滚动导轨的结构

1—压紧圈　2—支承块　3—密封板　4—滚珠

5—反向滚珠列　6—加油孔　7—侧板　8—导轨　9—保持架

④ 静压导轨。液体静压导轨是在两个相对运动的导轨面间通入压力油，使运动件浮起，工作过程中油膜压力随外载荷变化而变化以平衡作用在导轨上的外负载，在不同速度（包括静止）下都能保证导轨面间始终处于纯液体摩擦状态，从而大大减小了两导轨面作相对运动时的摩擦阻力，减小了拖动导轨运动时的动力消耗，并具有很高的运动精度。这种导轨的摩擦因数小（一般为 0.001 ~0.005），机械效率高，能长期保持导轨的导向精度；承载油膜有良好的吸振性，低速时不易产生爬行，所以在机床上得到日益广泛的应用。这种导轨的缺点是结构复杂，且需备置一套专门的供油系统，制造成本较高。

按承载方式的不同，液体静压导轨可分为开式和闭式两种。图 5-20a 所示为开式静压导轨工作原理图，开式静压导轨只能承受垂直方向的负载，不能承受颠覆力矩；图 5-20b 所示为闭式静压导轨工作原理图，闭式静压导轨能承受较大的颠覆力矩，导轨刚度也较大。

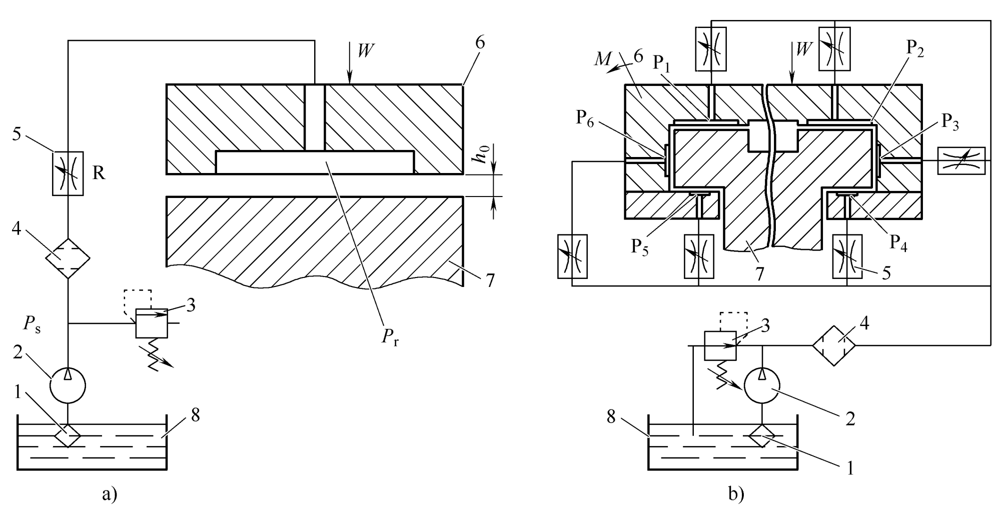


图 5-20　液体静压导轨工作原理图

a）开式静压导轨工作原理　b）闭式静压导轨工作原理

1、4—过滤器　2—液压泵　3—溢流阀　5—节流器

6—运动部件　7—固定部件　8—油箱

另外还有一种以空气为介质的空气静压导轨，不仅内摩擦阻力低，而且还有很好的冷却作用，可减小热变形。

4）自动换刀装置。为了进一步提高生产效率、改进产品质量及改善劳动强度，数控机床正朝着一台机床在一次装夹中完成多道工序加工的方向发展，因此，数控机床上最好具备自动换刀装置（又叫自动换刀系统，ATC）。自动换刀装置中，实现刀库与主轴间传递和装卸刀具的装置为刀具交换装置。常见的自动换刀装置主要有回转刀架换刀、更换主轴头换刀、更换主轴箱换刀和带刀库的自动换刀系统等几种形式。

① 回转刀架自动换刀装置。数控机床上使用的回转刀架是一种最简单的自动换刀装置（图 5-21），根据不同的适用对象，刀架可设计为四方形、六角形或其他形式。回转刀架可分别安装 4 把、6 把以及更多的刀具，并按数控装置发出的脉冲指令回转、换刀。

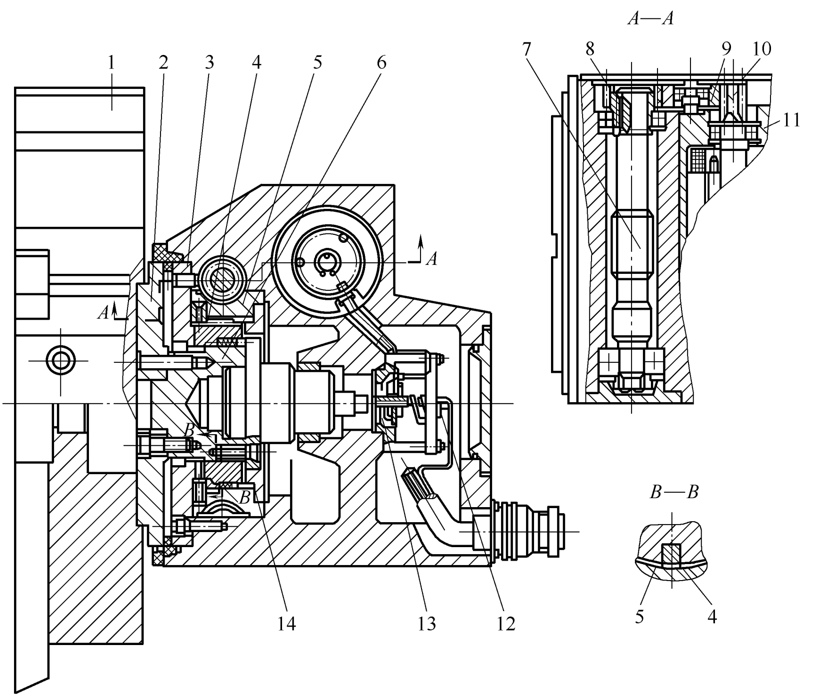


图 5-21　自动回转刀架

1—刀架　2、3—鼠牙盘　4—滑块　5—蜗轮　6—轴　7—蜗杆
8、9、10—齿轮　11—电动机　12—微动开关　13—小轴　14—圆盘

② 加工中心自动换刀装置。加工中心是在普通数控机床的基础上增加了自动换刀装置及刀库，并带有自动分度回转工作台或主轴箱（可自动改变角度）及其他辅助功能，从而使工件在一次装夹后，可以连续、自动完成多个平面或多个角度位置的钻、扩、铰、镗、攻螺纹、铣削等工序的加工，是工序高度集中的设备。

加工中心自动换刀装置的功能一般是通过机械手完成刀具的自动更换，它应当满足换刀时间短、刀具重复定位精度高、结构紧凑、安全可靠等要求。

加工中心刀库的种类有：直线刀库（刀具在刀库中直线排列、结构简单，存放刀具的数量有限，一般 8 ~ 12 把）；圆盘刀库（存刀量少则 6 ~ 8 把，多则 50 ~ 60 把，其有多种形式）；链式刀库（这种刀库刀座固定在链节上，常用的有单环链式刀库，一般存刀量小于 30 把，个别达 60 把，也有多环链式刀库，存刀量更大）；其他刀库，如格子箱式刀库，此种

刀库容量较大，可以使整箱刀库与机外进行交换。如图 5-22 所示为圆盘刀库，图 5-23 所示为链式刀库。

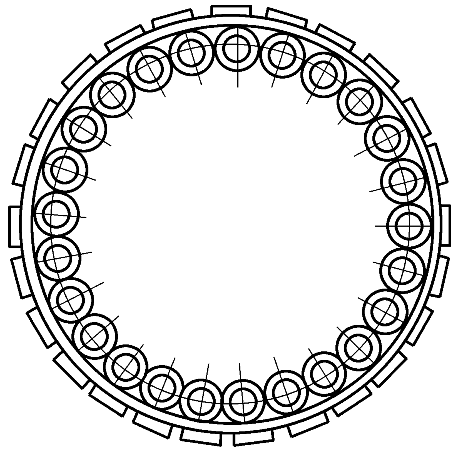


图 5-22　圆盘刀库

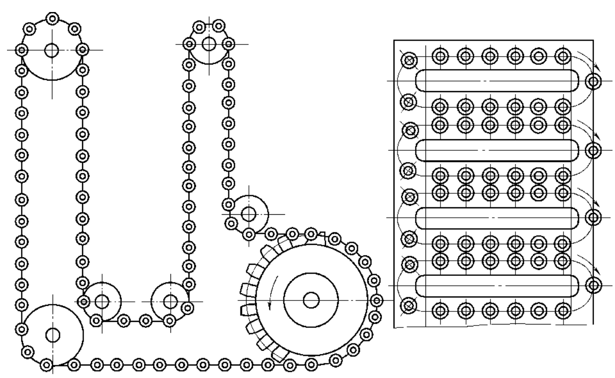


图 5-23　链式刀库
a）单链式　b）多链式

③ 换刀方式。刀具交换方式和刀库具体结构对机床的生产效率和工作可靠性有着直接的影响。刀具交换方式很多，一般分为无机械手换刀和有机械手换刀。

无机械手的换刀系统一般是采用把刀库放在主轴箱可以运动到的位置，同时，刀库中刀具的存放方向一般与主轴上的装刀方向一致。换刀时，由主轴运动到刀库上的换刀位置，利用主轴直接取走或放回刀具（图 5-24）。

带机械手交换刀具方式是采用机械手进行刀具交换方式，在加工中心中应用最为广泛。机械手是当主轴上的刀具完成一个工步后，把这一工步的刀具送回刀库，并把下一工步所需要的刀具从刀库中取出来装入主轴继续进行加工的功能部件。对机械手的具体要求是迅速可靠，准确协调。不同的加工中心所使用的换刀机械手也不尽相同。从手臂的类型来看，有单臂、双臂机械手。如图 5-25 所示为单臂单爪机械手，图 5-26 为双臂回转机械手，图 5-27 为双臂往复机械手。

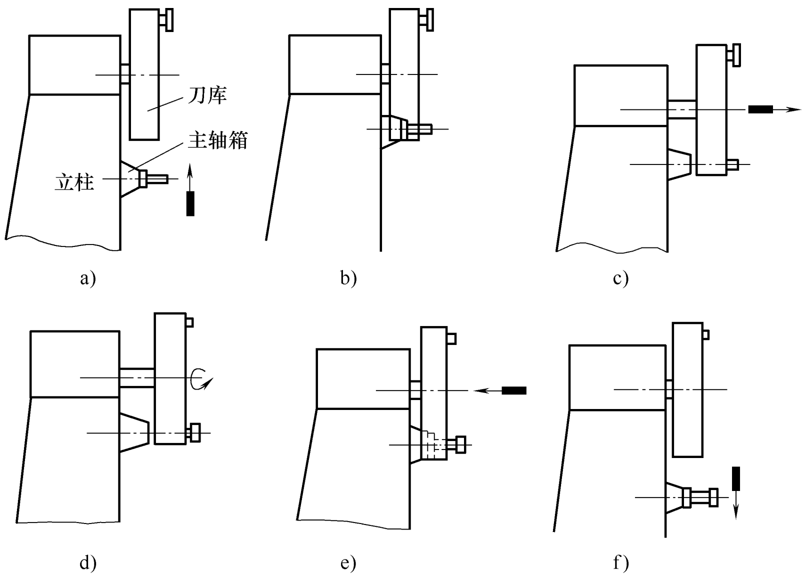


图 5-24　无机械手换刀过程
a）主轴定位　b）松开刀具夹紧装置　c）拔出刀具
d）转位、清洁　e）夹紧刀具　f）主轴回原位

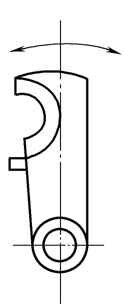


图 5-25　单臂单爪机械手

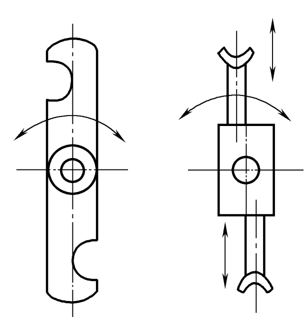


图 5-26　双臂回转机械手

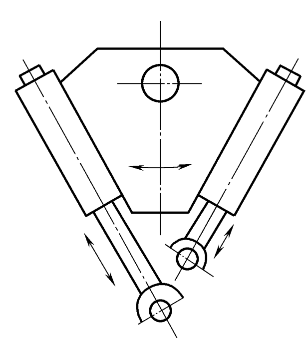


图 5-27　双臂往复机械手

④ 刀具的选择。根据换刀指令，刀具交换装置从刀库中挑选各工序所需刀具的操作称为自动选刀。常用的选刀方式主要有顺序选刀和任意选刀两种，任意选刀又分为刀具编码选刀、刀座编码选刀和记忆式选刀三种。

顺序选刀是在加工之前，将刀具按预定的加工工艺先后顺序依次插入刀库的刀座中，加工时按顺序选刀。用过的刀具放回原来的刀座内，也可以按加工顺序放入下一个刀座内。但加工不同的工件时必须重新调整刀具顺序，因而操作十分繁琐；而且同一工件、不同工序加工时，刀具也不能重复使用。由于该方式不需要刀具识别装置，驱动控制简单，工作可靠，因此，此种方式适合加工批量较大、工件品种数量较少的中、小型自动换刀数控机床。

刀具编码选刀方式是采用一种特殊的刀柄结构，对每把刀具按照二进制原理进行编码。换刀时通过编码识别装置在刀库中识别所需的刀具。刀具编码的识别方式主要有接触式刀具

识别（图 5-28）和非接触式刀具识别（图 5-29）两种。

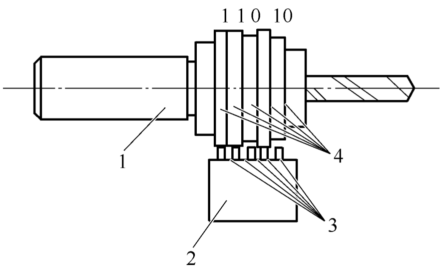


图 5-28　接触式刀具识别方式

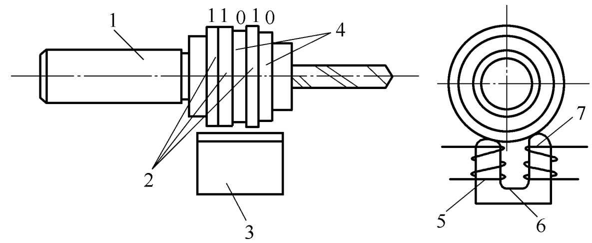


图 5-29　非接触式刀具识别方式

刀座编码选刀方式是对刀库中的刀座进行编码，并将与刀座编码对应的刀具放入刀座中，换刀时根据刀座的编码进行选刀。由于这种编码方式取消了刀柄中的编码环，刀柄结构大为简化。

记忆式选刀方式是绝大多数加工中心采用的选刀方式。它取消了传统的编码环和识别装置，利用软件构制一个模拟刀库数据表，其长度和表内设置的数据与刀库的刀座数及刀具号对应，选刀时数控装置根据数据表中记录的目标刀具位置，控制刀库旋转，将选中的刀具送到取刀位置，用过的刀具可以任意存放，由软件记住其存放的位置，因此具有方便灵活的特点。

3. 数控机床的主要辅助装置

为了扩大机床的工艺范围，数控机床除了具有直线进给功能外，还应具有绕 *X*、*Y*、*Z* 轴圆周进给或分度的功能。常用的回转工作台有分度工作台和数控回转工作台两种。

分度工作台的功能是将工件转位换面，完成分度运动，和自动换刀装置配合使用，实现工件一次安装能完成加工几个面的多种工序。

数控回转工作台除了用来进行各种圆弧加工或与直线进给联动进行曲面加工外，还可实现精确的自动分度工作。

此外，有的数控加工中心还有液压（气压）系统、排屑系统、夹具系统、自动上料系统等辅助系统。

5.1.3　数控铣床（加工中心）的加工对象及特点

1. 数控铣床（加工中心）的加工对象

数控铣削是机械加工中最常见的数控加工方法之一，除了能铣削普通铣床所能铣削的各种零件表面外，还能铣削普通铣床不能铣削的需要 2 ~ 5 坐标联动的各种平面轮廓和立体轮廓。因此数控铣削不仅可以加工各种平面、沟槽、螺旋槽、成形表面和孔，而且还能加工各种平面和空间的复杂型面，适合于加工各种模具、凸轮、板类及箱体类的零件。

根据数控铣削的特点，从加工的角度考虑，适合数控铣削的主要加工对象有三类：

（1）平面类零件　加工面平行或垂直于水平面或加工面与水平面的夹角为定角的零件称为平面类零件。如图 5-30 所示。

它的特点是各个加工单元面是平面或可以展开为平面。数控铣床上加工的绝大多数零件是平面类零件，一般只要用三坐标数控铣床的 2. 5 轴联动就可以加工出来。

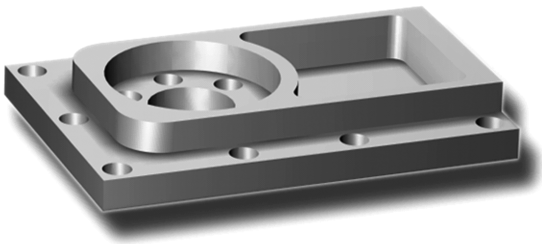
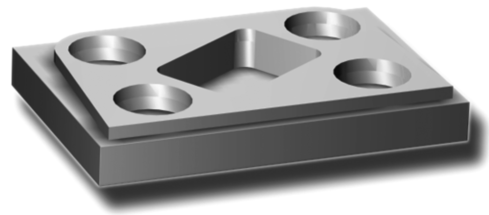



图 5-30　平面类零件

（2）变斜角类零件　加工面与水平面的夹角呈连续变化的零件称为变斜角类零件。这类零件多为飞机零件，其特点是加工面不能展开为平面，但在加工中，加工面与铣刀圆周接触的瞬间为一条线。加工这类零件最好采用四轴或五轴数控铣床摆角加工。

（3）曲面类零件　加工面为空间曲面的零件称为曲面类零件，又称立体类零件，如模具、叶片、螺旋桨等（图 5-31）。其特点是加工面不能展开为平面，加工面始终与铣刀点接触。这类零件通常采用三轴联动数控铣床配合球头铣刀加工，当曲面较复杂、通道较窄、会伤及相邻表面及需刀具摆动时，要采用四轴或五轴联动数控铣床加工。

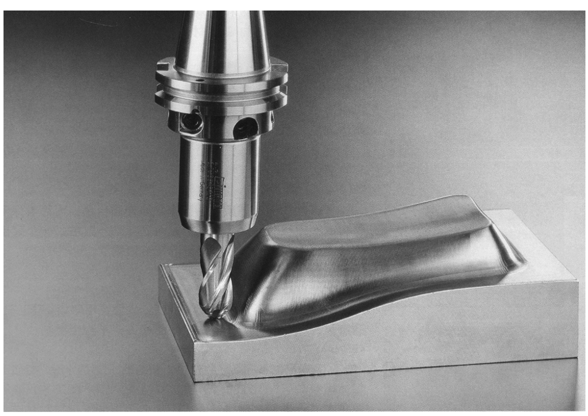



图 5-31　曲面类零件

2. 数控铣床（加工中心）的加工特点

由于数控铣床（加工中心）可用多种刀具、多种工艺，因此适宜于加工形状复杂、加工内容多、要求较高，需多种类型的普通机床和众多工艺装备，且经多次装夹和调整才能完成加工的零件，其具体加工特点如下：

1）加工灵活、通用性强。在数控铣床上能完成钻孔、镗孔、铰孔、铣平面、铣斜面、铣槽、铣曲面（凸轮）、攻螺纹等加工。

2）加工精度高。目前数控装置的脉冲当量一般为 0.001mm，高精度的数控系统可达 0.1μm，一般情况下都能保证工件精度。

3）生产效率高。一般不需要使用专用夹具等专用工艺装备；在更换工件时，只需调用储存于数控装置中的加工程序、装夹工件和调整刀具数据即可，因而大大缩短了生产周期；其次，数控铣床具有铣床、镗床和钻床的功能，使工序高度集中。

4）减轻操作者劳动强度。数控铣床对零件进行加工是按事先编好的加工程序自动完成

的，操作者除了操作控制器、装卸工件和中间测量及观察机床运行外，不需要进行繁重的重复性手工操作，大大减轻了劳动强度。

5.2　数控铣床（加工中心）刀具系统

5.2.1　数控铣床（加工中心）刀具的选择

数控铣床（加工中心）切削加工具有高速、高效的特点，与传统铣床切削加工相比较，数控铣床对切削刀具的要求更高，铣削刀具的刚性、强度、耐用度和安装调整方法都会直接影响切削加工的工作效率。刀具的本身精度，尺寸稳定性都会直接影响工件的加工精度及表面的加工质量，合理选用切削刀具也是数控加工工艺中的重要内容之一。

数控铣床（加工中心）上使用的刀具主要有铣削类刀具和孔加工类刀具。

1. 常用铣削类刀具的种类和工艺特点

1）面铣刀。面铣刀（图 5-32）的圆周表面和端面都有切削刃，端部切削刃为副切削刃。面铣刀多制成套式镶齿结构，用于加工面积较大的平面铣削。

2）立铣刀。立铣刀（5-33）的圆柱表面和端面上都有切削刃，它们可同时进行切削，也可单独进行切削。立铣刀圆柱表面的切削刃为主切削刃，端面上的切削刃为副切削刃。需注意的是，因为立铣刀的端面中间有凹槽，所以不可以做轴向进给。主要用于铣削面轮廓、槽面、台阶等。

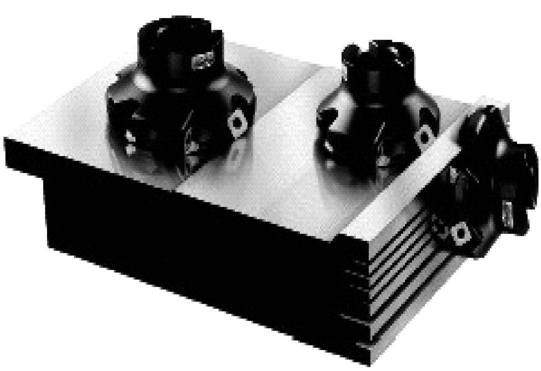


图 5-32　面铣刀



图 5-33　立铣刀

3）键槽铣刀。圆柱面和端面都有切削刃，端面切削刃延至中心。加工时先轴向进给达到槽深，然后沿键槽方向铣出键槽全长。主要用于铣槽面、键槽等。

4）成形铣刀。一般都是为特定的工件或加工内容专门设计制造的。主要用于加工成形面，如齿轮铣刀、螺纹铣刀（图 5-34）等。

5）球头铣刀。主要用于加工空间曲面，有时也用于平面类零件较大的转接凹圆弧的补加工。球头铣刀如图 5-35 所示。

6）盘铣刀。一般采用在盘状刀体上机夹刀片或刀头组成，常用于端铣较大的平面。

7）鼓形铣刀。主要用于对变斜角类零件的变斜角面的近似加工。

2. 常用孔加工类刀具的种类和工艺特点

1）数控钻头。用于精度要求较低的孔加工。



图 5-34　螺纹铣刀

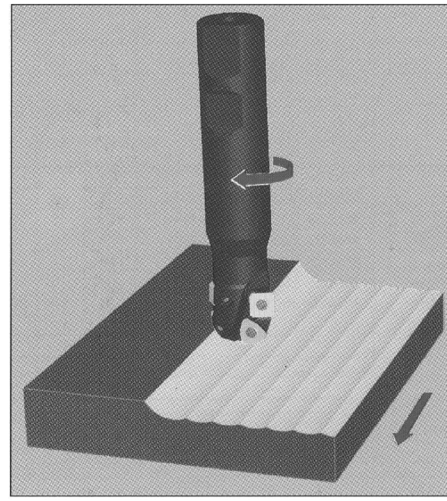


图 5-35　球头铣刀

2）数控铰刀。主要用于加工较小直径的高精度孔。

3）数控镗刀。一般用于加工较大直径的高精度孔。

4）丝锥。用于加工内螺纹。

3. 刀柄系统

数控铣床（加工中心）的刀柄是装夹刀具的部件，刀柄是用于连接机床和切削用刀具的数控工具系统，具有卡具的功能和量具的精度，直接关系到刀具是否得到正确使用，切削是否达到理想效果的关键因素所在。

1）刀柄类型。根据刀柄使用环境和几何尺寸，常用刀柄可以分为7∶24 锥度刀柄系统和1∶10 锥度刀柄 HSK 空心短圆锥高速模块式刀柄系统。

7∶24 锥度刀柄系统有 BT、SK、CAT、DIN 等各种标准，而 NT 在早期数控铣床上用的较多。多数刀柄都采用此种形式（图 5-36）。

1∶10 锥度刀柄 HSK 空心短圆锥高速模块式刀柄系统（图 5-37）。HSK 刀柄系统能够提高系统的刚性和稳定性以及在高速加工时的产品精度，并缩短刀具更换的时间，在高速加工中发挥很重要的作用。

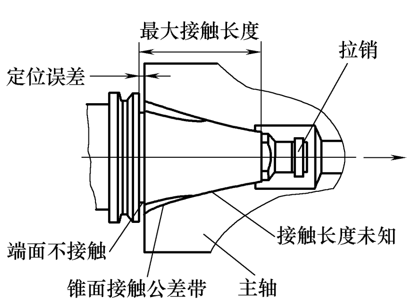


图 5-36　7∶24 锥度刀柄

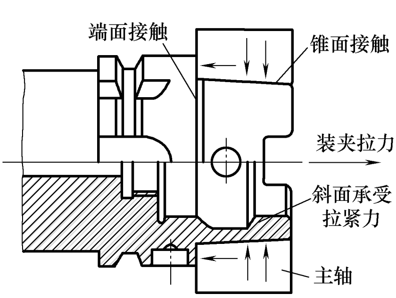


图 5-37　1∶10 锥度刀柄 HSK 刀柄

2）7∶24 锥度刀柄系统优缺点：

① 不自锁，可以实现快速装卸刀具。

② 刀柄的锥体在拉杆轴向拉力的作用下，紧紧地与主轴的内锥面接触。

③ 制造时只要将锥角加工到高精度即可保证连接的精度，所以成本相应比较低，而且使用可靠。

④ 7∶24 锥度刀柄连接锥度较大，锥柄较长，锥体表面同时要起两个重要作用，即刀柄相对于主轴的精确定位以及实现刀柄夹紧。

⑤ 在高速旋转时，由于离心力的作用，主轴前端锥孔会发生膨胀，膨胀量的大小随着旋转半径与转速的增大而增大，但是与之配合的 7∶24 锥度刀柄由于是实心的所以膨胀量较小，因此总的连接刚度会降低，在拉杆拉力的作用下，刀柄的轴向位移也会发生改变。每次换刀后刀柄的径向尺寸都会发生改变，存在着重复定位精度不稳定的问题。

3）1∶10 锥度刀柄 HSK 空心短圆锥刀柄系统优缺点。

① 动平衡好，适合于高速加工。重复定位精度高，一般在 0.002mm 以内。夹紧力大，支承好。径向圆跳动小，可达到 0.002～0.005mm。抗污能力好。在加工中防干涉能力好。

② 可换性差，每种规格刀柄只适安装一种柄径的刀具。

5.2.2　数控铣床（加工中心）的对刀

数控机床的调整是数控加工的重要任务，必须建立在对数控加工坐标系理解的基础上，反之了解数控机床的调整对于理解数控加工坐标系以及有关刀补指令很有帮助。数控铣床（加工中心）是一种功能较多的数控加工机床，使用多把刀具时，尤其要注意准确地确定各把刀具的基本尺寸，即正确地对刀。

常用对刀方法包括手动对刀和自动对刀。手动对刀是全部或者大部分采用手工方式完成的对刀过程，又分为机外手动对刀和机内手动对刀。机外手动对刀可利用光学对刀镜、对刀仪等工具完成对刀工作；机内手动对刀可利用寻边器等对刀装置与机床人机交互界面配合进行。自动对刀是利用数控装置，通过刀具自动检测系统实现的一种全自动的机内对刀过程，但其所需装置价格昂贵，调试较难，因此仅在少数高档数控机床上采用。下面介绍对刀仪对刀。

对刀仪的基本结构如图 5-38 所示。对刀仪平台 7 上装有刀柄夹持轴 2，用于安装被测刀具（图 5-39）。通过快速移动单键按钮 4 和微调旋钮 5 或 6，可调整刀柄夹持轴 2 在对刀仪平台 7 上的位置。当光源发射器 8 发光，将刀具刀刃放大投影到显示屏幕 1 上时，即可测得刀具在 X（径向尺寸）、Z（刀柄基准面到刀尖的长度尺寸）方向的尺寸。

钻削刀具的对刀操作过程如下：

1）将被测刀具与刀柄连接安装为一体。

2）将刀柄插入对刀仪上的刀柄夹持轴 2，并紧固。

3）打开光源发射器 8，观察刀刃在显示屏幕 1 上的投影。

4）通过快速移动单键按钮 4 和微调旋钮 5 或 6，可调整刀刃在显示屏幕 1 上的投影位置，使刀具的刀尖对准显示屏幕 1 上的十字线中心。

5）测得 X 方向尺寸，可用作刀具半径补偿。

6）测得 Z 方向刀具长度尺寸，可用作刀具长度补偿。

7）将测得尺寸输入加工中心的刀具补偿页面。

8）将被测刀具从对刀仪上取下后，即可装上加工中心使用。

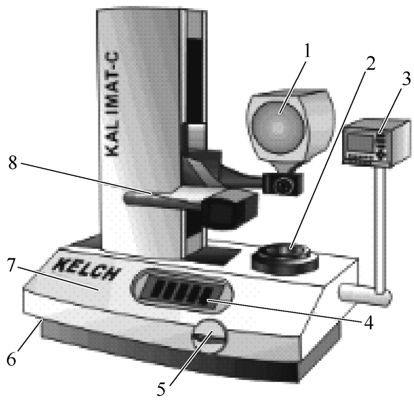


图 5-38　对刀仪基本结构

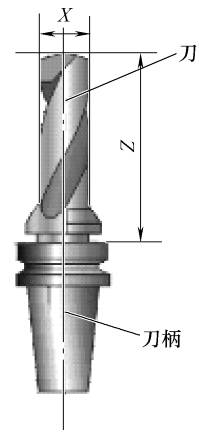


图 5-39　刀具

5.3　数控铣削加工工艺

5.3.1　加工工艺的确定

1. 数控铣削加工工艺的特点

数控铣削加工除了具有普通铣削加工的特点外，还有如下特点：

1）对零件加工的适应性强、灵活性好，能加工轮廓形状特别复杂或难以控制尺寸的零件。如模具类零件、壳体类零件等。

2）能加工普通机床无法加工或很难加工的零件。如用数学模型描述的复杂曲线零件以及三维空间曲面类零件。

3）能加工一次装夹定位后，需进行多道工序加工的零件。如在卧式铣床上可方便地对箱体类零件进行钻孔、铰孔、扩孔、镗孔、攻螺纹、铣削端面、挖槽等多道工序的加工。

4）加工精度高、加工质量稳定可靠。

5）生产自动化程序高，可以减轻操作者的劳动强度。有利于生产管理自动化。

6）生产效率高。一般可省去划线、中间检验等工作，可省去复杂的工装，减少对零件的安装、调整等工作。能通过选用最佳工艺线路和切削用量，有效地减少加工中的辅助时间，从而提高生产效率。

2. 加工工艺性分析

关于数控加工的零件图和结构工艺性分析，将结合数控铣削加工的特点作进一步说明。

（1）零件图分析

1）零件的形状与结构。检查零件的形状、结构在加工中是否会产生干涉或无法加工，是否妨碍刀具的运动。

2）零件的尺寸标注。检查零件的尺寸标注是否正确且完整，零件各几何要素的关系是否明确且充分，是否有利于编程，尺寸标注是否有矛盾，各项公差是否符合加工条件等。

3）零件的技术要求。分析零件的尺寸精度、几何公差和表面粗糙度等，确保在现有的加工条件下能达到零件的加工要求。

4）零件的材料。了解零件材料的牌号、切削性能及热处理要求，以便合理地选择刀具和切削参数，并合理地制定出加工工艺和加工顺序等。

（2）零件结构工艺性分析

1）零件的内形和外形最好采用统一的几何类型和尺寸，这样可以减少刀具规格和换刀、对刀次数，提高生产率。

2）内槽圆角和内轮廓圆弧不应太小（图 5-40）。

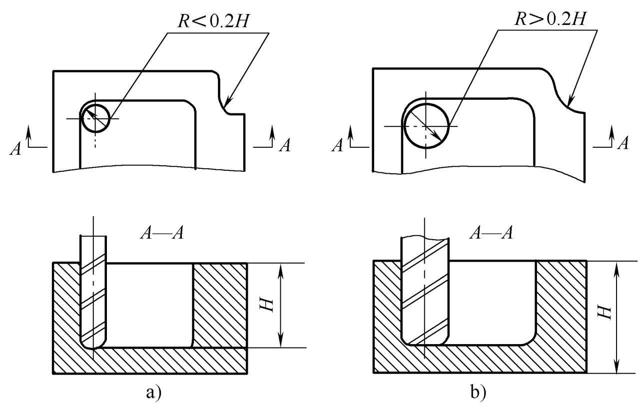


图 5-40　内槽圆角对加工工艺的影响

a）工艺性不好　b）工艺性好

3）铣槽底平面时，槽底圆角半径 r 不要过大（图 5-41）。

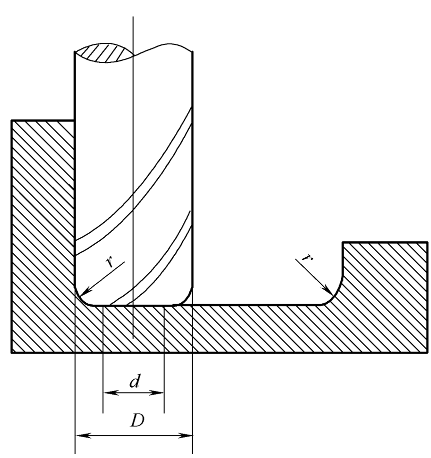


图 5-41　槽底圆角对加工工艺的影响

3. 加工工艺分析

（1）表面加工方法的选择　零件结构形状是多种多样的，铣削对象一般由平面、平面轮廓、孔、槽、曲面等表面组成。表面加工方法的选择，就是为零件上每一个有质量要求的表面选择一套合理的加工方法。

在选择时，一般先根据表面的精度和粗糙度要求选定最终加工方法，然后再确定精加工前准备工序的加工方法，即确定加工方案。由于获得同一精度和粗糙度的加工方法往往有几

种，在选择时除了考虑生产率要求和经济效益外，还应考虑下列因素：

1）工件材料的性质。材料切削性能不同在加工方法上也会不同。

2）工件的结构和尺寸。结构和尺寸决定着装夹和刀具的选择，同时也影响加工方法的选择。

3）生产类型。同一零件单件或批量生产上在加工方法上有很大的不同。

4）具体生产条件。加工方法选择受现有加工设备的功能和技术参数、工装设备及刀具等条件限制。

（2）加工阶段的划分　对于那些加工质量要求较高或较复杂的零件，通常将整个工艺路线划分为以下几个阶段：

1）粗加工阶段。主要任务是切除各表面上的大部分余量，使毛坯在形状上接近零件成品，其主要目的是提高生产率。

2）半精加工阶段。主要是使零件表面达到一定的精度，留有一定的精加工余量，并为主要表面的精加工做准备，且完成次要表面的加工，如扩孔、攻螺纹、铣键槽等。

3）精加工阶段。保证各主要表面达到图样上尺寸精度和表面粗糙度要求，目的是全面保证加工质量。

4）光整加工阶段。对于表面粗糙度（$Ra0.2\mu m$ 以下）和尺寸精度（IT6 级以上）要求很高的表面，需要进行光整加工。这个阶段的主要目的是提高尺寸精度，减少表面粗糙度，一般不能用于提高形状精度和位置精度。常用的加工方法有金刚镗、研磨、珩磨、超精加工、镜面磨、抛光及无屑加工等。

需要注意的是不是所有的零件加工都需要以上全部过程。

（3）加工顺序的安排

1）铣削加工顺序的安排。基面先行，零件上用来作定位装夹的精基准的表面应优先加工出来，这样定位越精确，装夹误差就越小。如箱体零件总是先加工定位用的平面和两个定位孔，再以平面和定位孔为精基准面装夹定位，用以加工其他孔系和平面。

① 先粗后精。按粗加工、半精加工、精加工、光整加工的顺序依次进行。

② 先主后次。先加工零件上的主要表面、装配基面，能及早发现毛坯中可能出现的缺陷。次要表面可穿插进行，放在主要加工表面加工到一定程度后，精加工之前进行。

③ 先面后孔。在铣削对象中，如箱体、平面轮廓尺寸较大、支架类零件，一般先加工平面，再加工孔和其他尺寸。一方面用加工过的平面定位，稳定可靠，另外在加工过的平面上加工孔，使钻孔时孔的轴线不易偏斜，提高孔的加工精度。

2）热处理工序的安排。热处理可以提高材料的力学性能，改善金属的切削性能以及消除残余应力。在制订工艺路线时，应根据零件的技术要求和材料的性质，合理地安排热处理工序。

① 退火与正火。退火或正火的目的是为了消除组织的不均匀，细化晶粒，改善金属的加工性能。对高碳钢零件用退火降低其硬度，对低碳钢零件用正火提高其硬度，以获得适中的较好的可切削性，同时能消除毛坯制造中的应力。退火与正火一般安排在机械加工之前进行。

② 时效处理。时效处理是以消除内应力、减少工件变形为目的。为了消除残余应力，在工艺过程中需安排时效处理。对于—般铸件，常在粗加工前或粗加工后安排一次时效处理；对于要求较高的零件，在半精加工后尚需再安排一次时效处理；对于一些刚性较差、精

度要求特别高的重要零件（如精密丝杠、主轴等），常常在每个加工阶段之间都安排一次时效处理。

③ 调质。调质是对零件淬火后再高温回火，能消除内应力、改善加工性能并能获得较好的综合力学性能。一般安排在粗加工之后进行。对一些性能要求不高的零件，调质也常作为最终热处理。

④ 淬火、渗碳和渗氮。淬火和渗碳的主要目的是提高零件的硬度和耐磨性，常安排在精加工（磨削）之前进行，其中渗氮由于热处理温度较低，零件变形很小，也可以安排在精加工之后。

3）辅助工序的安排。检验工序是主要的辅助工序，除每道工序由操作者自行检验外，在粗加工之后，精加工之前，零件转换车间时，以及重要工序之后和全部加工完毕、进库之前，一般都要安排检验工序。

除检验外，其他辅助工序有：表面强化和去毛刺、倒棱、清洗、防锈等。正确地安排辅助工序是十分重要的。如果安排不当或遗漏，将会给后续工序和装配带来困难，甚至影响产品的质量，所以必须给予重视。

（4）工序的划分　工序顺序的安排应根据零件的结构和毛坯状况、定位和夹紧的需要来考虑，重点是保证定位夹紧工件的刚性和有利于保证精度。

如上所述，零件加工的工步顺序已经排定，如何将这些工步组成工序，就需要考虑采用工序集中还是工序分散的原则。在数控铣床或加工中心上加工零件时，一般采用工序集中的原则划分。

在数控机床上特别是在加工中心上加工零件，由于其工艺特点，工序十分集中，许多零件只需在一次装卡中就能完成全部工序。但是零件的粗加工，特别是铸、锻毛坯零件的基准平面、定位面等的加工应在普通机床上完成之后，再装卡到数控机床上进行加工。这样可以发挥数控机床的特点，保持数控机床的精度，延长数控机床的使用寿命，降低数控机床的使用成本。在数控机床上工序划分的方法有：

1）刀具集中分序法。即按所用刀具划分工序，用同一把刀加工完零件上所有可以完成的部位，再用第二把刀、第三把刀完成它们可以完成的其他部位。这种分序法可以减少换刀次数，压缩空程时间，减少不必要的定位误差。

2）粗、精加工分序法。这种分序法是根据零件的形状、尺寸精度等因素，按照粗、精加工分开的原则进行分序。对单个零件或一批零件先进行粗加工、半精加工，而后精加工。粗精加工之间，最好隔一段时间，以使粗加工后零件的变形得到充分恢复，再进行精加工，以提高零件的加工精度。

3）按加工部位分序法。即先加工平面、定位面，再加工孔；先加工简单的几何形状，再加工复杂的几何形状；先加工精度比较低的部位，再加工精度要求较高的部位。

① 要注意工序间的衔接，上道工序的加工不能影响下道工序的定位与夹紧，中间穿插普通机床加工工序的也要综合考虑。

② 先进行内形、内腔的加工工序，后进行外形加工工序。

③ 以相同定位、夹紧方式，或用同一把刀具加工的工序，最好连接进行，以减少重复定位次数、换刀次数与挪动压紧元件次数。

④ 在同一次安装中进行的多道工序，应先安排对刚性破坏较小的工序。

总之，在数控机床上加工零件，其加工工序的划分要视加工零件的具体情况具体分析。

4. 加工方法的选择

数控铣削加工对象的主要加工表面一般可采用表5-1所列的加工方案。

表5-1　常用铣削加工方案

序　　号	加 工 表 面	加 工 方 案	所使用的刀具
1	平面内外轮廓	X、Y、Z方向粗铣→内外轮廓方向分层半精铣→轮廓高度方向分层半精铣→内外轮廓精铣	整体高速钢或硬质合金立铣刀；机夹可转位硬质合金立铣刀
2	空间曲面	X、Y、Z方向粗铣→曲面Z方向分层粗铣→曲面半精铣→曲面精铣	整体高速钢或硬质合金立铣刀、球头铣刀；机夹可转位硬质合金立铣刀、球头铣刀
3	孔	定尺寸刀具加工 铣削	麻花钻、扩孔钻、铰刀、镗刀 整体高速钢或硬质合金立铣刀；机夹可转位硬质合金立铣刀
4	外螺纹	螺纹铣刀铣削	螺纹铣刀
5	内螺纹	攻螺纹 螺纹铣刀铣削	丝锥 螺纹铣刀

5. 数控铣削加工工艺制定

零件图分析和工艺分析完成后，各道数控加工工序的内容已经基本确定，接下来便可以着手工艺的制定。加工工艺制定的主要任务是进一步把本工序的加工内容、加工用量、工艺装备、定位夹紧方式以及刀具的运动轨迹都具体确定下来，为编制加工程序作好详细的准备。

主要内容有：

1）走刀路线的确定。

2）零件装夹及夹具选择。

3）对刀点和换刀点的确定。

4）刀具选择。

5）切削用量选择。

5.3.2　铣削走刀路线的确定

走刀路线合理与否，关系到工件的加工质量与生产效率。尤其在数控铣削曲面零件过程中，应认真分析零件的加工要求及其结构特点，找出走刀路线中影响加工效率的因素，在保证零件加工精度和表面粗糙度要求的前提下，应尽量缩短加工路线，从而提高数控机床的加工效率，降低加工成本。

1. 走刀路线的确定原则

影响走刀路线的因素很多，有工艺方法、工件材料及状态、加工精度及表面粗糙度要求、工件刚度、加工余量、刀具的刚度及耐用度、机床类型和工件的轮廓形状等。在确定走刀路线时，主要应遵循以下原则：

1）保证产品质量，应将保证工件的加工精度和表面粗糙度要求放在首位。

2）在保证工件加工质量的前提下，应力求走刀路线最短，并尽量减少空行程时间，提高加工效率。

3）在满足工件加工质量、生产效率等条件下，尽量简化数学处理的数值计算工作量，以简化编程工作。

此外，在确定走刀路线时，还要综合考虑工件、机床与刀具等多方面因素，确定一次走刀还是多次走刀，以及设计刀具的切入点与切出点，切入方向与切出方向。在铣削加工中，还要确定是采用顺铣还是逆铣等。

2. 铣削走刀路线的确定方法

（1）顺铣和逆铣　铣削过程是断续切削，会引起冲击振动，切削层总面积是变化的，铣削均匀性差，铣削力的波动较大。采用合适的铣削方式对提高铣刀耐用度、工件质量、加工生产率影响很大。

铣削有逆铣和顺铣两种方式，当铣刀的旋转方向和工件的进给方向相同时称为顺铣，相反时称为逆铣，如图 5-42 所示。

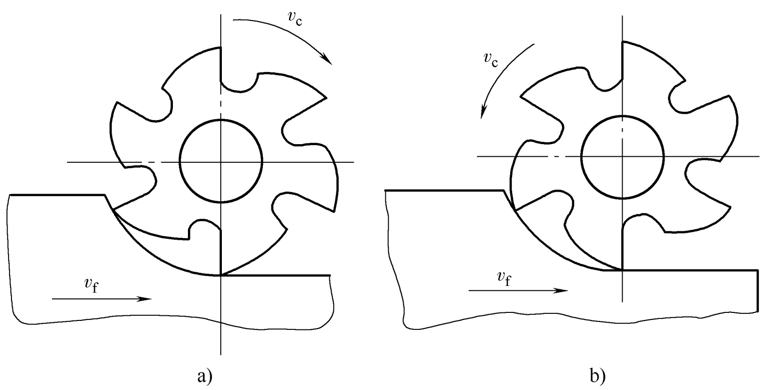


图 5-42　铣削方式

a）逆铣　b）顺铣

逆铣时，刀具从已加工表面切入，切削厚度从零逐渐增大，不会造成从毛坯面切入而打刀；其水平切削分力与工件进给方向相反，使铣床工作台进给的丝杠与螺母传动面始终抵紧，不会受丝杠螺母副间隙的影响，铣削较平稳。但刀齿在刚切入已加工表面时，会有一小段滑行、挤压，使这段表面产生严重的冷硬层，下一个刀齿切入时，又在冷硬层表面滑行、挤压，不仅使刀齿容易磨损，而且使工件的表面粗糙度增大；同时，刀齿垂直方向的切削分力向上，不仅会使工作台与导轨间形成间隙，引起振动，而且有把工件从工作台上挑起的倾向，因此需较大的夹紧力。

顺铣时，刀具从待加工表面切入，切削厚度从最大逐渐减小为零，切入时冲击力较大，刀齿无滑行、挤压现象，对刀具寿命有利；其垂直方向的切削分力向下压向工作台，减小了工件上下的振动，对提高铣刀加工表面质量和工件的夹紧有利。但顺铣的水平切削分力与工件进给方向一致，当水平切削分力大于工作台摩擦力（例如遇到加工表面有硬皮或硬质点）时，使工作台带动丝杠向左窜动，丝杠与螺母传动副右侧面出现间隙，硬点过后丝杠螺母副的间隙恢复正常，这种现象对加工极为不利，会引起“啃刀”或“打刀”，甚至损坏夹具或机床。

顺铣与逆铣的确定。当工件表面有硬皮、机床的进给机构有间隙时，应选用逆铣，因逆铣时，刀齿是从已加工表面切入的，不会崩刃，机床进给机构的间隙不会引起振动和爬行，因此粗铣时尽量采用逆铣。当工件表面无硬皮、机床进给机构无间隙时，应选用顺铣。因为顺铣加工后，零件表面质量好，刀齿磨损小，刀具寿命高（试验表明，顺铣时刀具的寿命比逆铣时高 2 ~3 倍），因此精铣时，应尽量采用顺铣。另外，对于铝镁合金、钛合金和耐热合金等材料，为了降低表面粗糙度值，提高刀具寿命，应尽量采用顺铣加工。

（2）平面铣削路线

1）单次平面铣削的刀具路线。对于单次平面铣削的刀具路线，可用面铣刀进入材料时的切入角来讨论。

面铣刀的切入角由刀心位置相对于工件边缘的位置决定。如图 5-43a 所示刀心位置在工件内（但不跟工件中心重合），切入角为负；如图 5-43b 所示刀具中心在工件外，切入角为正。刀心位置与工件边缘重合时，切入角为零。

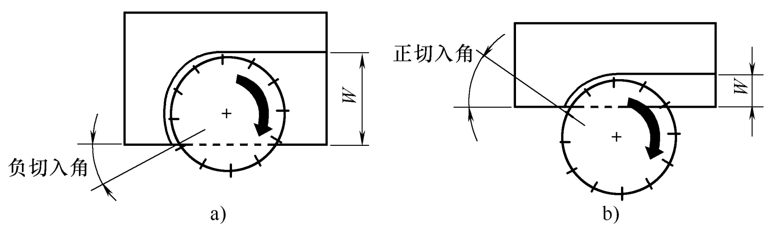


图 5-43　面铣刀的切入角（W 为切削宽度）

a）负切入角　b）正切入角

平面铣削的特点：

① 如果工件只需一次切削，应该避免刀心轨迹与工件中心线重合。刀具中心处于工件中间位置时容易引起颤振，从而使加工质量较差，因此，刀具轨迹应偏离工件中心线。

② 当刀心轨迹与工件边缘线重合时，切削刀具进入工件材料时的冲击力最大，是最不利刀具加工的情况。因此应该避免刀具中心线与工件边缘线重合。

③ 如果切入角为正，刚刚切入工件时，刀片相对于工件材料的冲击速度大，引起碰撞力也较大。所以正切入角容易使刀具破损或产生缺口，基于此，拟定刀心轨迹时，应避免正切入角。

④ 使用负切入角时，已切入工件材料的刀刃承受最大切削力，而刚切入（撞入）工件的刀刃受力较小，引起碰撞力也较小，从而可延长刀具寿命，且引起的振动也小一些。

2）多次平面铣削的刀具路线。铣削大面积工件平面时，铣刀不能一次切除所有材料，因此在同一深度需要多次走刀。多次铣削的刀路有多种，每一种方法在特定环境下具有各自的优点。最为常见的方法为同一深度上的单向多次切削和双向多次切削（图 5-44）。

单向多次切削时，切削起点在工件的同一侧，另一侧为终点的位置，每完成一次切削后，刀具从工件上方回到切削起点的一侧，如图 5-44a、b 所示，这是平面铣削中常见的方法，频繁的快速返回运动导致效率很低，但它能保证面铣刀的切削总是顺铣。

双向多次切削也称为 Z 形切削，如图 5-44c、d 所示，它的应用也很广泛。其效率比单向多次切削要高，但铣削中顺铣、逆铣交替，从而在精铣平面时影响加工质量，因此平面质

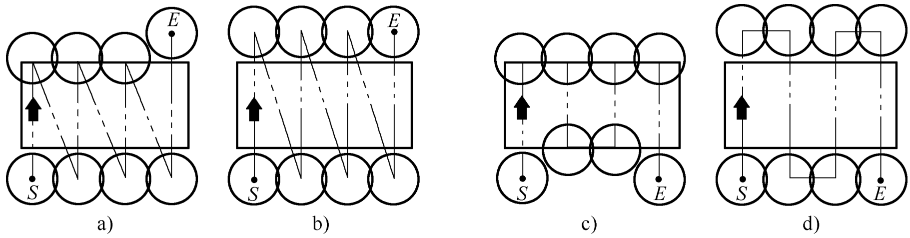


图 5-44　平面铣削的多次刀路
a）粗加工　b）精加工　c）粗加工　d）精加工

量要求高的平面精铣通常并不使用这种刀路。

不管使用哪种切削方法，起点 S 和终点 E 与工件之间都有安全间隙，确保刀具安全和加工质量。

（3）铣削轮廓的加工路线　刀具切入零件时，应沿切削起始点延伸线（图 5-45a）或切线方向（图 5-45b）逐渐切入工件，保证零件曲线的平滑过渡。同样，在切离工件时，也要沿着切削终点延伸线（图 5-45a）或切线方向（图 5-45b）逐渐切离工件。

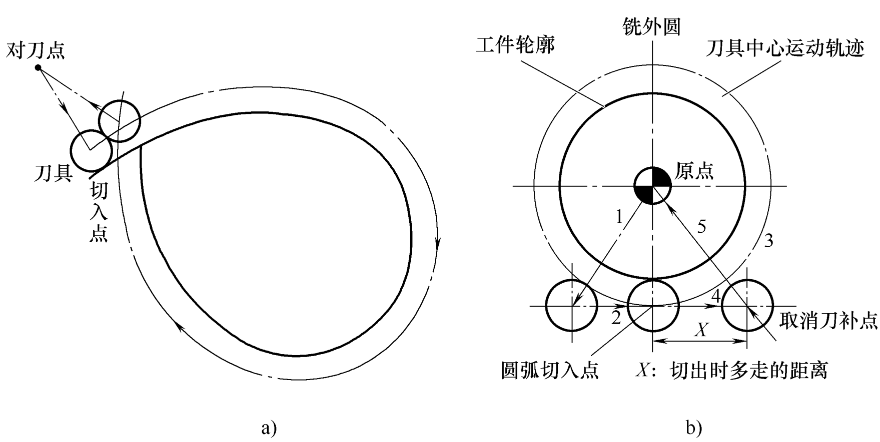


图 5-45　刀具切入和切出外轮廓的加工路线

铣削内轮廓同铣削外轮廓一样，刀具同样不能沿轮廓曲线的法向切入和切出。此时刀具可以沿一过渡圆弧切入和切出工件轮廓。

（4）铣削内槽的加工路线

1）下刀方法的确定。在内槽铣削中，由于是把坯件中间的材料去掉，刀具不可能像铣外轮廓一样从外面下刀切入，而要从坯件的实体部位下刀切入，因此在型腔铣削中下刀方式的选择很重要，常用以下三种方法：

① 使用键槽铣刀沿 Z 向直接下刀，切入工件。

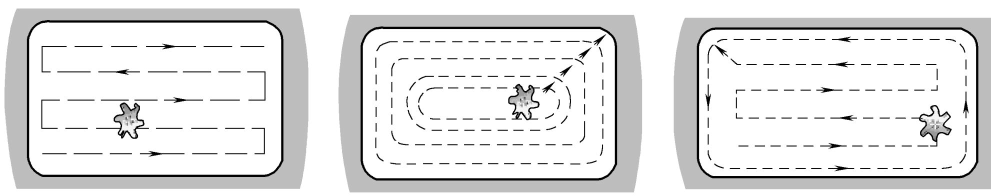
② 先用钻头钻下刀工艺孔，立铣刀通过下刀工艺孔垂向进入再进行圆周铣削。

③ 使用立铣刀螺旋下刀或者斜插式下刀。

螺旋下刀，即在两个切削层之间，刀具从上一层的高度沿螺旋线以渐近的方式切入工件，直到下一层的高度，然后开始正式切削。

2）内槽铣削路线的确定。对于内槽加工的走刀路线常有行切、环切和综合切削三种方法。

如图5-46所示为加工内槽的三种加工路线。图5-46a和图5-46b分别用行切法和环切法加工内槽。共同点是都能切净内腔中全部面积，不留死角，不伤轮廓，同时尽量减少重复进给的搭接量。不同点是行切法的加工路线比环切法短，但行切法将在每两次进给的起点与终点间留下了残留面积，而达不到所要求的表面粗糙度；用环切法获得的表面粗糙度要好于行切法，但环切法需要逐次向外扩展轮廓线，刀位点计算稍微复杂一些。综合行、环切法的优点，采用图5-46c所示的加工路线，即先用行切法切去中间部分余量，最后用环切法切一刀，既能使总的加工路线较短，又能获得较好的表面粗糙度。



a)　　b)　　c)

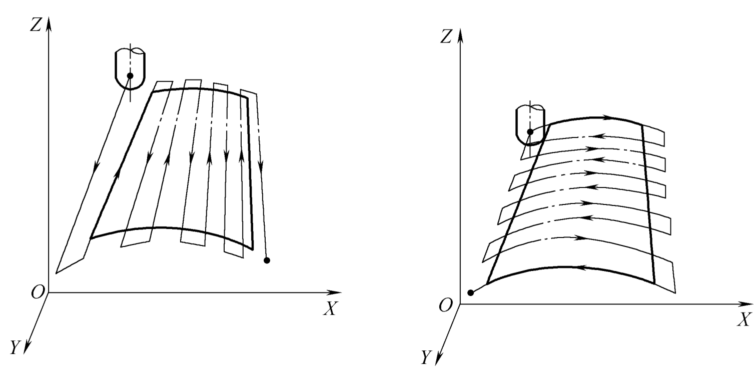
图5-46　铣削内槽的三种加工路线

a）行切法　b）环切法　c）先行切后环切

（5）铣削曲面的加工路线

1）对曲率变化不大和精度要求不高的曲面粗加工。

采用图5-47a加工方案时，每次沿直线加工，刀位点计算简单，程序少，加工过程复合直纹面的形成，可以准确保证母线的直线度；采用图5-47b加工方案时，符合这类零件数据给出情况，便于加工后检验，叶形的准确度高，但程序较多。



a)　　b)

图5-47　铣削曲面的两种加工路线

2）对曲率变化较大和精度要求较高的曲面精加工，常用 X、Y、Z 三轴联动插补的行切法加工，如图5-48所示。

3）对于叶轮、螺旋桨这样的零件，因其叶片形状复杂，刀具容易与相邻表面发生干涉，常用五轴联动加工，其加工原理如图5-49所示。

5.3.3　铣削用夹具的选择

数控铣床上的工件装夹方法与普通铣床一样，所使用的夹具往往并不很复杂，只要求简单的定位、夹紧机构就可以了。但要将加工部位敞开，不能因装夹工件而影响进给和切削加

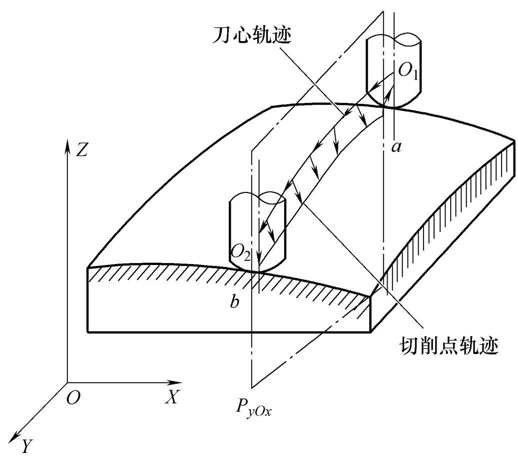


图 5-48　三轴联动行切法加工曲面的切削点轨迹

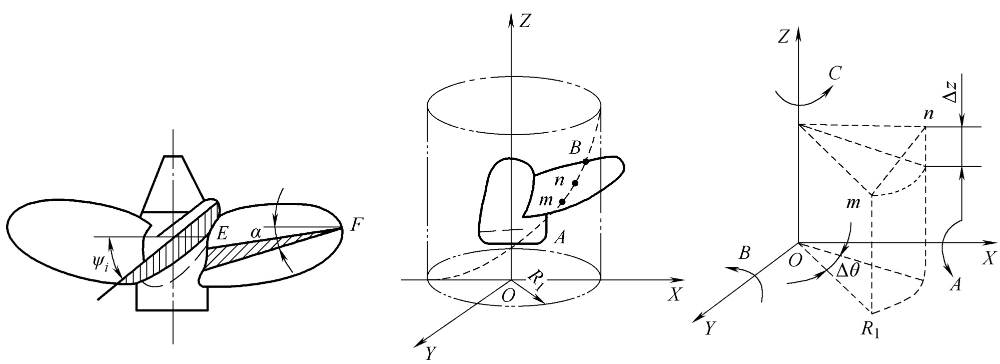


图 5-49　曲面的五轴联动加工

工。一般选择顺序是：单件生产中尽量选用机用虎钳、压板螺钉等通用夹具，批量生产时优先考虑组合夹具，其次考虑可调夹具，最后考虑选用成组夹具和专用夹具。

1. 机用虎钳

如图 5-50 所示，是最为简单常用的通用夹具。

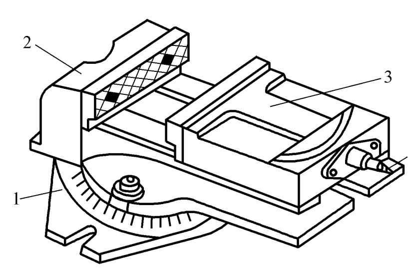


图 5-50　机用虎钳

1—底座　2—固定钳口　3—活动钳口　4—螺杆

2. 组合夹具

组合夹具是由一套结构已经标准化、尺寸已经规范化的通用元件、组合元件所构成。可以按工件的加工需要组成各种功用的夹具。组合夹具分槽系组合夹具和孔系组合夹具两大类，我国以槽系为主。

（1）槽系组合夹具的规格　如图 5-51 所示为一槽系组合夹具及其组装过程。为了适应不同工厂、不同产品的需要，槽系组合夹具分大、中、小型三种规格。

（2）孔系组合夹具　如图 5-52 所示为德国 BIUCO 公司的孔系组合夹具组装示意图。元件与元件间用两个销钉定位，一个螺钉紧固。定位孔孔径有 10mm、12mm、16mm、24mm 四个规格；相应的孔距为 30mm、40mm、50mm、80mm；孔径公差为 H7，孔距公差为 ±0.01mm。

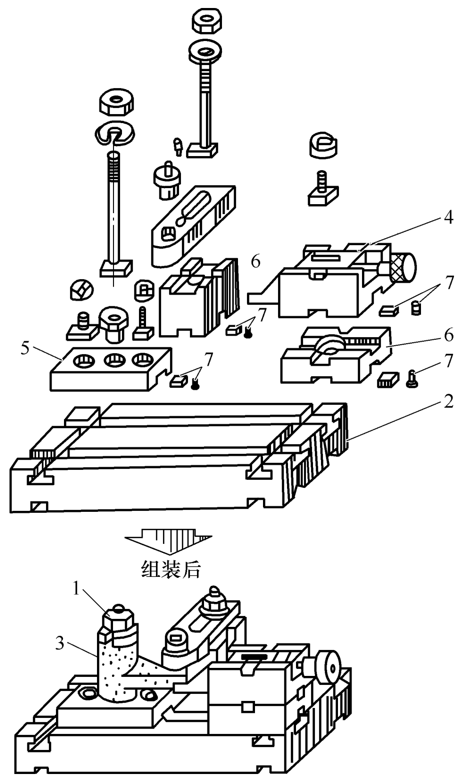


图 5-51　槽系组合夹具

1—紧固件　2—基准板　3—工件　4—活动 V 形块　5—支承板　6—垫块　7—定位键及其紧定螺钉

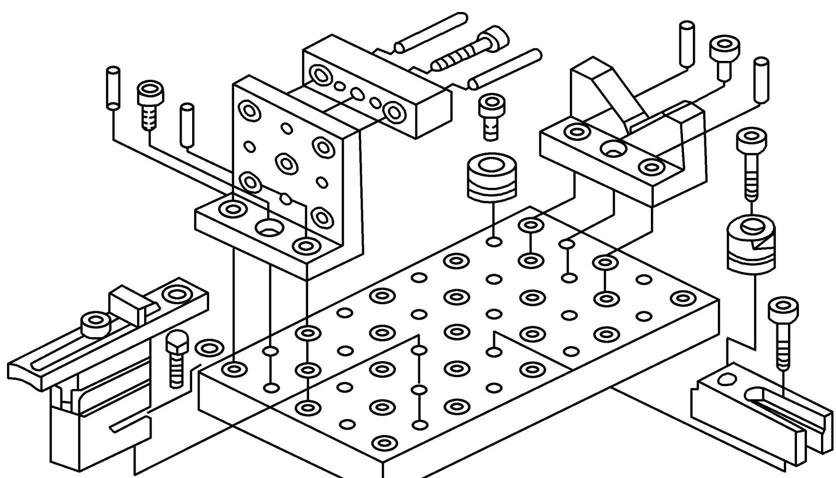


图 5-52　BIUCO 孔系组合夹具

孔系组合夹具的元件用一面两圆柱销定位，属允许使用的过定位；其定位精度高，刚性比槽系组合夹具好，组装可靠，体积小，元件的工艺性好，成本低，可用作数控机床夹具。但组装时元件的位置不能随意调节，常用偏心销钉或部分开槽元件进行弥补。

5.3.4　铣削切削用量的选择

铣削加工的切削参数包括切削速度、进给速度、背吃刀量和侧吃刀量。切削用量的选择标准是：在保证零件加工精度和表面粗糙度的前提下，充分发挥刀具的切削性能，保证合理的刀具寿命并充分发挥机床的性能，最大限度的提高生产率，降低成本。

从保证刀具寿命的角度出发，铣削切削用量的选择方法是先选择背吃刀量（或侧吃刀量），其次确定进给速度，最后确定切削速度。

1. 背吃刀量 a_p（端铣）或侧吃刀量 a_e（圆周铣）的选择（图 5-53）

背吃刀量或侧吃刀量的选取主要由加工余量和对表面质量的要求决定。

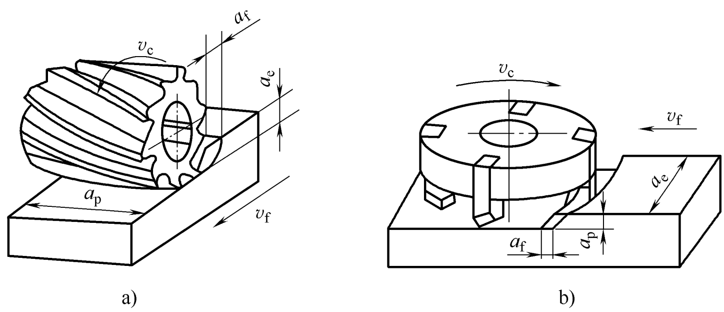


图 5-53　铣削用量
a）圆周铣　b）端铣

1）粗铣时一般一次进给应尽可能切除全部余量，在中等功率机床上，背吃刀量可达 8 ~ 10mm。在工件表面粗糙度值要求为 Ra12.5 ~ 25μm 时，如果圆周铣削的加工余量小于 5mm，端铣的加工余量小于 6mm，粗铣一次进给就可以达到要求。但在余量较大，工艺系统刚性较差或机床动力不足时，应分两次进给完成。

2）半精铣时，端铣的背吃刀量或圆周铣的侧吃刀量一般在 0.5 ~ 2mm 内选取，加工工件的表面粗糙度值可达 Ra3.2 ~ 12.5μm。

3）精铣时，端铣的背吃刀量一般取 0.3 ~ 1mm，圆周铣的侧吃刀量一般取 0.2 ~ 0.5mm，加工工件的表面粗糙度可达 Ra0.8 ~ 3.2μm。

2. 进给速度 F 与进给量 f 的选择

铣削加工的进给速度 F 是单位时间内工件与铣刀沿进给方向的相对位移量，单位为 mm/min；进给量 f 是铣刀转一周，工件与铣刀沿进给方向的相对位移量，单位为 mm/r。对于多齿刀具，其进给速度 F、刀具转速 n、刀具齿数 z、进给量 f 及每齿进给量 f_z 的关系为

$$F = fn = f_z zn$$

进给速度 F 与进给量 f 主要根据零件的加工精度和表面粗糙度要求以及刀具、工件的材料性质选取，可参考常用切削用量手册。

3. 选择切削速度 v_c

铣削的切削速度 v_c 与刀具的耐用度、每齿进给量、背吃刀量、侧吃刀量以及铣刀齿数成反比，而与铣刀直径成正比。其原因是当 f_z、a_p、a_e 和 z 增大时，刀刃负荷增加，而且同时工作的齿数也增多，使切削热增加，刀具磨损加快，从而限制了切削速度的提高。为提高刀具寿命允许使用较低的切削速度。加大铣刀直径则可改善散热条件，提高切削速度。

4. 主轴转速 n

数控铣床一般是以刀具旋转为主运动，因此，按上述方法确定切削速度后，应把切削速度转换为主轴转速，其转换公式为

$$n = 1000v_c/(\pi D)$$

式中，D 为铣刀直径，单位为 mm，v_c 为切削速度，单位为 m/min。

计算出来的 n 值要进行圆整处理，当数控机床的主轴速度是分级变速时，要选取最接近 n 值的速度档位。

5.4 数控铣削编程

5.4.1 概述

1. 机床坐标系

在以前的章节中已经讲述了数控机床坐标系的建立方法，这里不再赘述。需要注意的是：永远假定刀具移动、工件静止。数控铣床或者加工中心按照主轴的布置方式可分为立式和卧式，其机床坐标系的方向是不同的。数控立式铣床（加工中心）坐标系如图 5-54 所示，数控卧式铣床（加工中心）坐标系如图 5-55 所示。

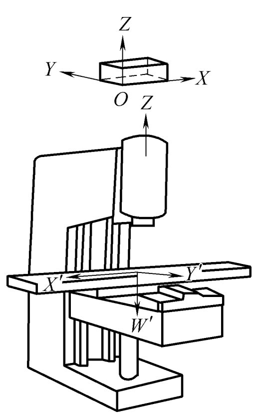


图 5-54 数控立式铣床（加工中心）坐标系

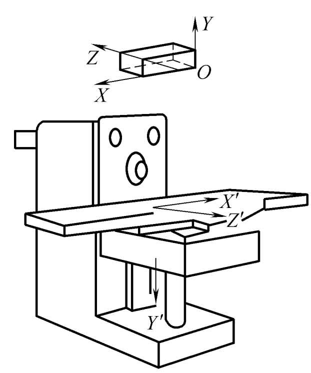


图 5-55 数控卧式铣床（加工中心）坐标系

2. 机床坐标系原点、机床参考点

机床坐标系原点（机床零点、机械零点）。在规定了机床坐标轴和方向后，必须再确定机床原点，才能建立机床坐标系。机床坐标系原点是机床上一个固定点，其位置由机床设计和生产厂家确定（使用者一般无法改变），可由该机床的操作使用说明书（手册）查阅。

本章主要介绍的是 SINUMERIK 840D 系统的数控铣床（加工中心），其机床坐标系原点（M）一般设置在工作台上表面左下角（图 5-56）。

机床参考点一般取在 X、Y、Z 三个直角坐标轴正方向的极限位置上。

在数控机床回参考点（也叫做回零）操作后，显示器显示的是机床参考点相对机床坐标原点的相对位置的数值。机床起动后，首先要将机床返回参考点（回零），即执行手动返回参考点操作，使各轴都移至机床参考点，这样在执行加工程序时，才能有正确的工件坐标系。

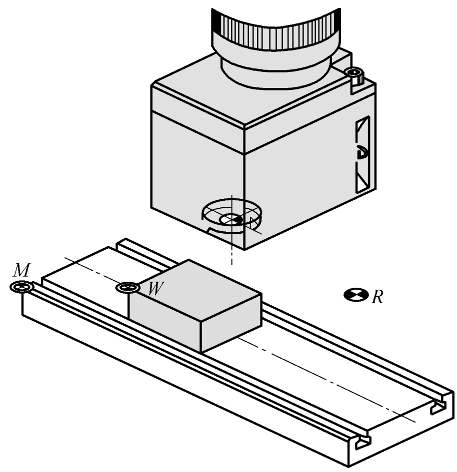


图 5-56　数控铣床（加工中心）坐标系原点机床原点、参考点、工件坐标系原点

3. 工件坐标系

工件坐标系的各坐标轴名称和方向必须与所使用的数控机床坐标系相应的名称和方向相同。

工件坐标系的原点是指根据加工零件图样选定的编制零件程序的原点，即编程坐标系的原点。编程原点由编程人员自己确定，应该尽量选择在零件的设计基准或工艺基准上，或者是工件的对称中心上，并考虑编程的方便性。

5.4.2　数控铣削基本编程指令及编程方法（SINUMERIK 840D 系统）

数控铣削（包括数控铣床和数控加工中心）的编程规则和程序格式和数控车床相同。

1. 数控铣削基本指令

数控指令（指令字）是程序的最小单元，一般是由字母和数字组成。一般数控指令可以分为以下几类：准备功能指令、辅助功能指令和其他功能指令。

（1）准备功能指令　准备功能指令，又叫 G 指令，是在数控系统插补运算之前需要预先规定，为插补运算做好准备的工艺指令。G 指令一般由地址 G 后跟两位数字组成，但本系统中所有指令的第一个数字“0”可省略（如：G01 与 G1 等效）。SINUMERIK 840D 数控铣床 G 指令及功能见表 5-2。

表 5-2　SINUMERIK 840D 数控铣床 G 指令及功能

序　号	指　令	组　别	功　能	备　注
1	G00	第 1 组 运动指令 （插补方式）	快速定位	
2	G01		以进给速率直线插补	*
3	G02		顺时针圆弧插补	
4	G03		逆时针圆弧插补	
5	G33		螺纹切削（恒螺距）	
6	G04	第 2 组 特殊运动	刀具暂停，不做进给运动	
7	G74		回参考点	
8	G75		回固定的点	

（续）

序　号	指　令	组　别	功　能	备　注
9	G17	第 3 组 平面选择	*XY* 平面	*
10	G18		*ZX* 平面	
11	G19		*YZ* 平面	
12	G40	第 4 组 刀具半径补偿	刀具半径补偿取消	*
13	G41		刀具半径左补偿	
14	G42		刀具半径右补偿	
15	G500	第 5 组 可设定零点补偿	取消可设定零点偏置	*
16	G54		第一可设定零点偏置	
17	G55		第二可设定零点偏置	
18	G56		第三可设定零点偏置	
19	G57		第四可设定零点偏置	
20	G58		第五可设定零点偏置	
21	G59		第六可设定零点偏置	
22	G53	第 6 组 取消可设定零点偏置	取消可设定零点偏置 程序段有效	
23	G60	第 7 组 定位性能	准停	*
24	G64		连续路径方式	
25	G09	第 8 组 程序段准停	准停 程序段有效	
26	G70	第 9 组 寸制/米制尺寸	寸制尺寸	
27	G71		米制尺寸	*
28	G90	第 10 组 绝对/增量尺寸	绝对尺寸	*
29	G91		增量尺寸	
30	G94	第 11 组 进给量单位	进给率 *F* 单位：mm/min	*
31	G95		进给率 *F* 单位：mm/rev	
32	G96	第 12 组 主轴速度单位	恒定切削线速度开	
33	G97		恒定切削线速度取消	*

注：1. 表中第 2、6、8 组指令都是在本程序段有效，即都为非模态指令，其余指令均为模态指令。
2. 在每组模态指令组别中，备注栏中都有一个带有“*”的指令表示机床通电就起效，即系统默认指令。
3. 每组指令在同一程序段中只能出现一个，但是不同组指令可以在同一程序段中出现。

G 指令按功能类别分为模态指令和非模态指令。模态指令是指一旦被指定，功能一直保持到出现同组其他代码时才失效，否则继续保持有效。非模态指令只在本程序段中有效。

（2）辅助功能指令　辅助功能主要用于机床开关量的控制。如主轴的起停、切削液的启闭等。M 指令一般由地址 M 后跟两位数字组成，但本系统中所有指令的第一个数字“0”可省略（如：M08 与 M8 等效）。常用的辅助功能的 M 指令含义及用途见表 5-3。

表 5-3　常用的辅助功能的 M 指令含义及用途

序　号	指　令	含　义	用　途
1	M00	程序停止	在 NC 程序段中使用 M0 使加工停止。可以进行去除切屑，再次测量等
2	M01	可选停止	可以通过机床面板操作设定，可以中断加工过程，这样，操作人员就可以在加工过程中进行一些操作，比如去除切屑、测量等
3	M02	主程序结束	用于程序的最后程序点，表示程序结束，机床处于复位状态，并返回到程序开始
4	M03	主轴顺时针旋转	主轴正转
5	M04	主轴逆时针旋转	主轴反转
6	M05	主轴停止	主轴停止运行
7	M06	换刀	用于加工中心
8	M08	切削液开	切削液打开
9	M09	切削液关	切削液关闭
10	M10	分度头锁紧	分度头锁住
11	M11	分度头松开	分度头松开
12	M17	子程序结束	子程序结束，返回主程序
13	M30	程序结束	程序结束，效果同 M2

2. 常用指令的运用

数控铣削（加工中心）的常用指令和数控车削的常用指令基本一致，本章主要介绍与数控车削不同的指令用法。

（1）刀具指令（T）　刀具补偿指令（D），换刀指令（M6）　在数控车床中使用 T 指令在刀库中查找并更换目标刀具。同时激活、调用对应刀号所存储的刀具补偿值 D。

格式：T __ D __

示例：

N86 T1 D1 M6；　　　　更换 1 号刀具，并调用 1 号刀具的 1 号补偿

…

N94 T2 D1 M6；　　　　更换 2 号刀具，并调用 2 号刀具的 1 号补偿

（2）进给量指令（F）　进给速度单位指令（G94、G95）　设定刀具切削时的进给速度数值及单位。

G94：线性进给量，单位：mm/min（铣削默认）

G95：旋转进给量，单位：mm/r

G95：以主轴转速为基准（通常为切削主轴或车床上的主轴）

格式：N110 G94（G95）F __

示例：

N100 S1000 M3 F100；　　　刀具切削进给速度为 100mm/min

…

N150 G95 F0.1；　　　　刀具切削进给速度为 0.1mm/r

(3) 平面选择指令　每两个坐标轴确定一个平面。第三个坐标轴始终垂直于该平面。在编程时要求告知控制系统在哪一个平面上加工，从而可以正确地计算刀具补偿。对于确定的圆弧编程方式和极坐标系，平面的定义同样很有必要。

G17：*XY* 平面（铣削默认）

G18：*XZ* 平面

G19：*YZ* 平面

格式：

G18（G18、G19）

(4) 插补指令　快速定位指令（G0）、直线插补指令（G1）、圆弧插补指令（G2、G3）的功能、格式与数控车床的相同，只是加工平面有所不同。但是需要注意的是，铣削加工时，圆弧插补可能会加工优弧，甚至整圆，其格式会发生变化。

当采用半径编程时，圆心角小于或等于 180°，其半径值为正值；圆心角大于 180°，其半径值为负值；加工整圆时，不能采用半径编程，最好采用圆心编程。

示例：

…

N100 G1 X25 Y0 F100；	刀具以 100mm/min 的速度直线进给到圆弧起点 *A*（图 5-57）
N110 G3 X0 Y25 CR =25；	采用圆弧终点和圆弧半径进行逆时针劣圆弧进给到点 *B*
(N110 G3 X0 Y25 CR = −25；)	采用圆弧终点和圆弧半径进行逆时针优圆弧进给到点 *B*

…

…

N100 G1 X60 Y0 F100；	刀具以 100mm/min 的速度直线进给到圆弧起点 *A*（图 5-58）
N110 G2 X60 Y0 I-60 J0；	采用圆弧终点和圆心坐标进行顺时针进给回到点 *A*
(N110 G3 I-60 J0；)	采用圆弧终点和圆心坐标进行逆时针进给回到点 *A*

…

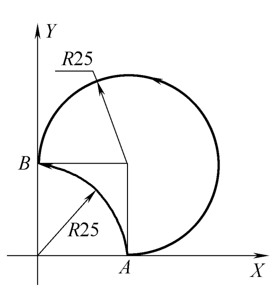


图 5-57　G2、G3 指令示意图

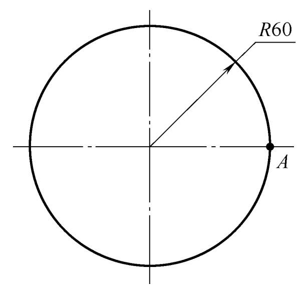


图 5-58　整圆编程

(5) 坐标转换指令　坐标转换指令可以在同一程序中对坐标系进行调整。G54 ~ G59 指令通过可设定的零点偏移，可以在所有轴上依据基准坐标系的零点设置工件零点（图 5-59）。

G53 指令可在本程序段取消可设定零点偏移。TRANS 指令可编程零点偏移，表示相对于当前所调用的 G54 ~ G57 指令中有效坐标系的坐标原点进行平移（图 5-60）。

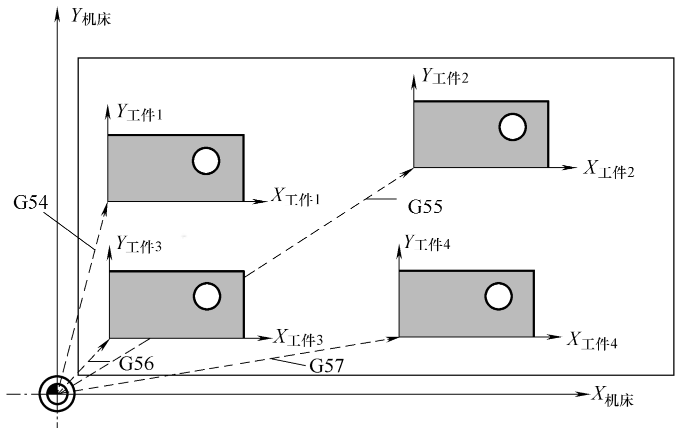


图 5-59　可设定零点偏移指令

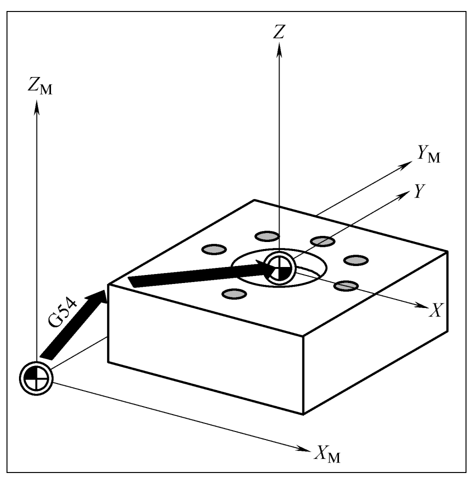


图 5-60　可编程零点偏移

但是要注意的是：一般车床编程中，零点偏移，只偏移 Z 轴坐标，但是在铣削中，可能 X、Y、Z 轴都要偏移。

示例：

N10 G54；	建立工件坐标系
N20 L20；	调用子程序 L20 一次，加工工件 1
N30 G55；	坐标系平移到新位置
N40 L20；	调用子程序 L20 一次，加工工件 2
N50 G56；	坐标系平移到新位置
N60 L20；	调用子程序 L20 一次，加工工件 3
N70 G57；	坐标系平移到新位置
N40 L20；	调用子程序 L20 一次，加工工件 4

…

（6）刀具补偿指令　使用刀具半径补偿后，控制系统自动计算不同刀具时等距离的刀具位移。

G40：取消刀具半径补偿。

G41：刀具半径左补偿，沿加工方向刀具在轮廓的左侧加工（图 5-61）。

G42：刀具半径右补偿，沿加工方向刀具在轮廓的右侧加工。

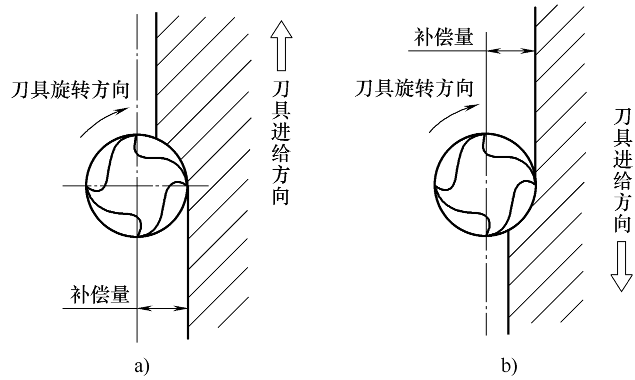


图 5-61　G41、G42 指令

a）左刀具补偿：G41　b）右刀具补偿：G42

注意：刀具必须有相应刀号 *D* 才有效。只有在线性插补时（G00、G01）才可以进行 G41 或者 G42 的选择。控制器自动计算出当前刀具运行所应有的与编程轮廓等距离的刀具轨迹（图 5-62）。

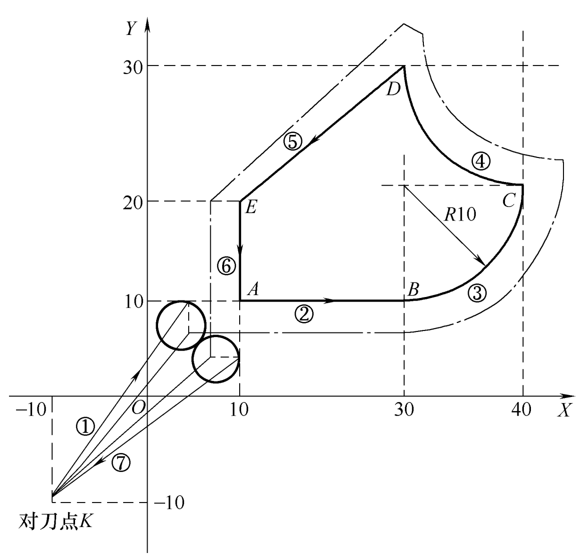


图 5-62　刀具补偿的运用

示例：

…

N050 T1 D1 M6;　　　　　　　确定刀具及补偿号

…

```
N100 G0 X-10 Y-10;              刀具快速定位到对刀点 K
N110 G42 X5 Y10;                建立刀具右补偿
N120 G1 X30 F100;               加工 A～B 段，直线插补
N130 G3 X40 Y20 CR=10;          加工 B～C 段，逆时针圆弧插补
N140 G2 X30 Y30;                加工 C～D 段，顺时针圆弧插补
N150 G1 X10 Y20;                加工 D～E 段，直线插补
N160 Y5;                        加工 E～A 段，直线插补
N170 G40 G0 X-10 Y-10;          取消刀具半径补偿，快速定位回到对刀点 K
…
```

5.4.3　固定循环

同数控车削一样，数控铣削中需要多次进刀切削或者轮廓比较复杂的轮廓表面，可以采用固定循环编程。固定循环可以有效地缩短程序长度、减少程序所占内存、减少计算量、节省编程时间。

1. 浅孔钻削循环

（1）功能　一般用于浅孔钻削，一次性钻削到位。

（2）格式　CYCLE81（RTP，RFP，SDIS，DP，DPR）。CYCLE81 参数见表 5-4。

CYCLE81 参数示意如图 5-63 所示。

表 5-4　CYCLE81 参数

参　　数	数据类型	含　　义
RTP	实数	返回平面位置坐标
RFP	实数	参考平面位置坐标
SDIS	实数	安全距离（无符号输入）
DP	实数	加工深度位置坐标
DPR	实数	相对参考平面的加工深度（无符号输入）

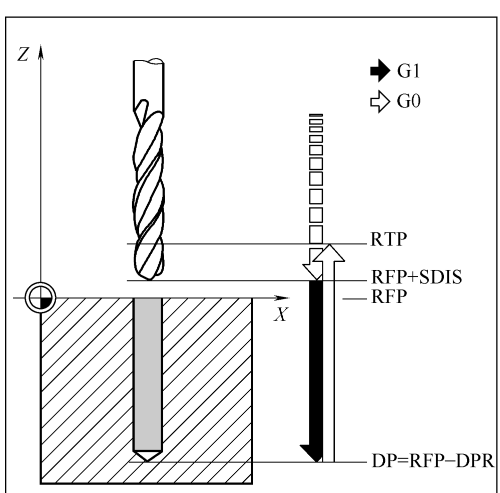


图 5-63　CYCLR81 参数示意

（3）含义

1）RTP 是指循环结束后刀具回到的位置轴线坐标。

2）RFP 一般是指加工平面的上表面轴线坐标，因此 RTP 应高于 RFP 的位置，即 RTP 应大于 RFP。

3）SDIS 是安全距离，即在加工表面上方一定距离，作为刀具从快速定位转换到直线插补的分界面。

4）DP 和 DPR 都是确定加工深度的参数，区别在于 DP 是加工底部轴线坐标，而 DPR 是加工表面到加工底部的距离。DP 和 DPR 参数二者选一确定即可。

（4）工作过程　浅孔钻削前，刀具应运行到浅孔正上方。循环开始后，刀具首先快速定位到浅孔上方距离为 SDIS 的位置；然后刀具变为之前设定的进给速度开始钻削，直到浅孔底部；之后快速回退到 RTP 处，循环结束。

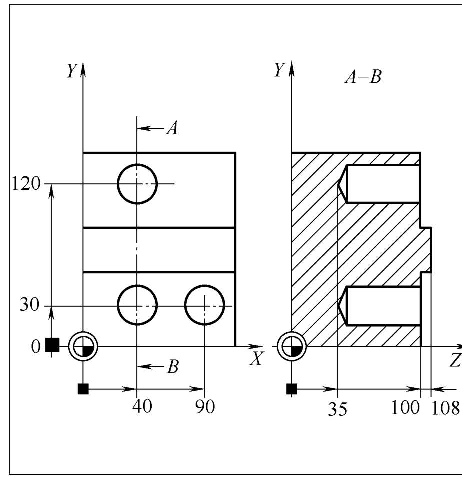


图 5-64　CYCLE81 应用示例

（5）示例　加工如图 5-64 所示工件。

主要程序如下：

```
…
N30 G0 X40 Y120；
N40 CYCLE81（110，100，2，35，0）；
N50 Y30；
N60 CYCLE81（110，100，2，0，65）；
N70 X90；
N80 CYCLE81（110，100，2，0，65）；
…
```

2. 锪孔循环

（1）功能　一般用于锪孔、镗台阶孔，比较浅孔钻削的区别在于孔底刀具有暂停进给的动作。

（2）格式　CYCLE81（RTP，RFP，SDIS，DP，DPR，DTB）。CYCLE82 参数见表 5-5。

CYCLE82 参数示意如图 5-65 所示。

表 5-5　CYCLE82 参数

参　数	数据类型	含　义
RTP	实数	返回平面位置坐标
RFP	实数	参考平面位置坐标
SDIS	实数	安全距离（无符号输入）
DP	实数	加工深度位置坐标
DPR	实数	相对参考平面的加工深度（无符号输入）
DTB	实数	最后加工到位后的停顿时间

（3）含义

1）RTP、RFP、SDIS、DP、DPR 的含义与用法和 CYCLE81 一样。

2）DTB 是指刀具在孔底暂停进给时间，单位为 s。

（4）工作过程　工作过程和 CYCLE81 基本一致，唯一的区别在于刀具在孔底需要暂停一定时间，由 DTB 确定，刀具在孔底暂停时，主轴还保持运转。

（5）示例　加工如图 5-64 所示工件。

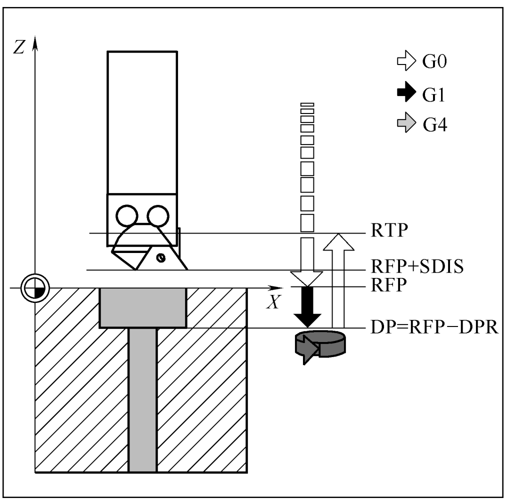


图 5-65　CYCLE82 参数示意

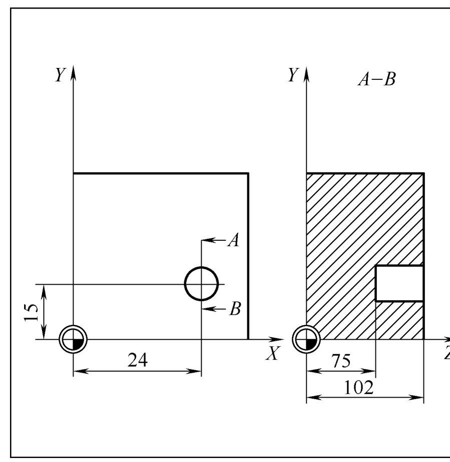


图 5-66　CYCLE82 应用示例

主要程序如下：

```
…
N30 G0 X24 Y15；
N40 CYCLE82（110，102，4，75，0，1）；
…
```

3. 深孔钻削

（1）功能　用于深孔钻削。刀具在钻孔过程中，有若干次断屑处理。

（2）格式　CYCLE83（RTP，RFP，SDIS，DP，DPR，FDEP，FDPR，DAM，DTB，DTS，FRF，VARI，_AXN，_MDEP，_VRT，_DTD，_DISI）。CYCLE83 参数见表 5-6，CYCLE83 部分参数示意如图 5-67 所示。

表 5-6　CYCLE83 参数

参　数	数据类型	含　义
RTP	实数	返回平面位置坐标
RFP	实数	参考平面位置坐标
SDIS	实数	安全距离（无符号输入）
DP	实数	加工深度位置坐标
DPR	实数	相对参考平面的加工深度（无符号输入）
FDEP	实数	第一次钻孔位置坐标

（续）

参　数	数据类型	含　义
FDPR	实数	相对参考平面第一次钻孔距离
DAM	实数	递减钻孔深度（无符号输入）
DTB	实数	每次钻到位后底部暂停
DTS	实数	孔口暂停
FRF	实数	第一次钻孔深度的进给速度倍率（0.001～1）
VARI	整数	断屑形式（只能选择0、1）
_AXN	整数	钻孔轴线选择
_MDEP	实数	最小钻孔深度
_VRT	实数	VARI＝0时起效，表示退回距离（无符号输入）
_DTD	实数	最后孔底暂停
_DISI	实数	VARI＝1时起效，表示退回孔外距离（无符号输入）

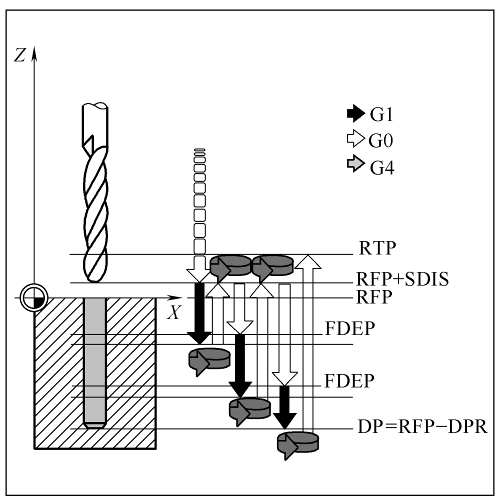


图5-67　CYCLE83部分参数示意

（3）含义

1）RTP、RFP、SDIS、DP、DPR的含义与用法和CYCLE81一样。

2）FDEP与FDPR的关系和DP与DPR的关系相同，其中FDEP、DP是坐标值。而FEPR、DPR是相对于参考平面RFP的距离。同样FDEP与FDPR二者选一确定即可。

3）DAM是递减钻孔深度，是指下一次钻削比上一次钻削减少的钻削量。

4）DTB是指每次钻削到位后刀具暂停。如果大于零表示时间，单位是s；如果小于零表示暂停主轴旋转若干转所用时间，单位是r。

5）DTS是孔口暂停。同样如果大于零表示时间，单位是s；如果小于零表示暂停主轴旋转若干转所用时间，单位是r。

6）FRF是第一次钻削时，为防止钻孔位置发生打滑、偏移，刀具进给速度倍率系数，取值范围为0.001～1。

7）VARI是断屑方式。

VARI＝0表示每次钻削后刀具回退一定距离（一般不退出孔外，保证断屑）。

VARI＝1 表示每次钻削后刀具退出孔外一定距离（有利于排屑）。

8）_AXN 是钻孔轴线的选择。当前平面的第一轴选择 1，第二轴选择 2、第三轴选择 3。如在 *XY* 平面内加工孔，其轴线为 *Z* 轴，则应选择 3.

9）_MDEP 是最小钻孔深度。

10）_VRT 是断屑退回距离。这个参数只有在 VARI＝0 时才能起效，若设置本参数为 0，则系统默认退刀 1mm。

11）_DTD 是最终孔底的暂停。如果大于零表示时间，单位是 s；如果小于零表示暂停主轴旋转若干转所用时间，单位是 r。

12）_DISI 是退出孔外距离。这个参数只有在 VARI＝1 时才能起效，若设置本参数为 0，则系统默认退出孔外 1mm。

（4）工作过程　该循环钻孔过程经过多次反复钻削而成。

第一步，刀具从孔的正上方快速定位到参考平面 RFP 上方 SDIS 距离的位置。若 DTS 非零，则暂停一定的时间。

第二步，以之前确定的进给速度 FRF 倍开始进给，指导第一次加工深度，若 DTB 非零，则暂停一定的时间。

第三步，若 VARI＝0，则回退_VRT 确定的距离，再判断是否暂停；若 VARI＝1，则退出孔外_DISI 确定的距离，再判断是否暂停。

第四步，再次钻削，但是要递减 DAM 距离，到位后判断是否暂停、回退位置、再次钻削前是否暂停。

第五步，最后钻削到最深位置，判断是否暂停，结束后快速回退至回退平面。

（5）示例　加工如图 5-68 所示工件。

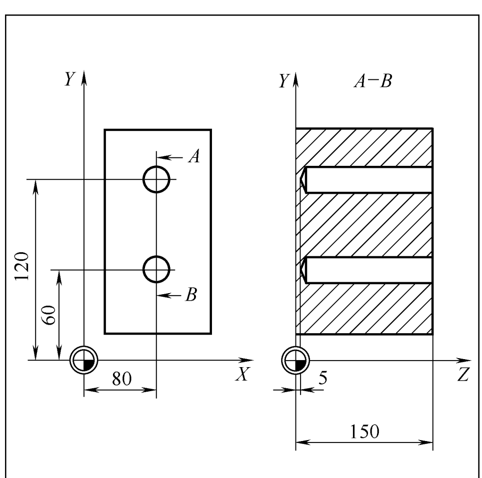


图 5-68　CYCLE83 应用示例

主要程序如下：

…

N30 G0 X80 Y120；　　　　　　快速定位到第一个孔位置

N40 CYCLE83（155，150，1，5，0，100，0，10，1，0，1，0，3，30，0，0，0）；

回退平面位置为 $Z=155$mm 处，孔的上表面（参考平面）为 $Z=150$mm 处，安全距离为 1mm，最终孔底位置为 $Z=5$mm 处，第一次加工到 $Z=100$mm 处（既第一次钻削深度为 50mm），下一次钻削深度比上一次少 10mm，钻孔前、后都不暂停，第一次钻孔进给速度倍率为 1（不减速），断屑方式为退刀断屑（不退出孔外），加工轴线为空所在平面第三轴 Z 轴，最小加工深度为 30mm，每次断屑退刀高度默认为 1mm

N50 G0 Y60；　　　　　　　　快速定位到第二个孔位置

N60 CYCLE83（155，150，1，5，0，100，0，10，1，0，1，0，3，30，0，0，0）；

…

4. 刚性攻螺纹

（1）功能　用于刚性攻螺纹，即不带补偿衬套攻螺纹。

（2）格式　CYCLE84（RTP，RFP，SDIS，DP，DPR，DTB，SDAC，MPIT，PIT，POSS，SST，SST1，_AXN，_PTAB，_TECH，_VARI，_DAM，_VRT）。CYCLE84 部分参数见表 5-7。

表 5-7　CYCLE84 部分参数

参　　数	数据类型	含　　义
SDAC	整数	循环结束后的主轴旋向（3、4、5 分别用于 M3、M4、M5）
MPIT	实数	标准螺纹公称直径
PIT	实数	螺纹导程
POSS	实数	主轴位置，用于循环中定向停（单位：度）
SST	实数	攻螺纹主轴转速
SST1	实数	退回主轴转速
_PTAB	整数	螺纹类型
_TECH	整数	工艺设置
_VARI	整数	攻螺纹方式
_VRT	实数	回退距离

（3）含义

1）RTP、RFP、SDIS、DP、DPR、DTB、_AXN、_DAM 的含义与用法和 CYCLE83 一样。

2）MPIT 是标准螺纹公称直径，PIT 是导程，若加工标准螺纹，则二者选一即可；若加工非标螺纹，一般确定 PIT 数值。

3）_PTAB 是螺纹类型。_PTAB = 0，由机床尺寸系统决定（一般机床尺寸系统为米制）；_PTAB = 1，米制螺纹；_PTAB = 2，寸制螺纹；_PTAB = 3，螺纹单位为 m/r。

4）_VARI 是攻螺纹方式。_VARI = 0，一次性攻螺纹；_VARI = 1，断屑攻螺纹（丝锥不退出孔外）；_VARI = 2，排屑攻螺纹，丝锥每次退刀，刀具要退出孔外。

5）_VRT 是回退距离，_VARI = 1、2 时，分别为刀具回退距离和退出孔外距离。

（4）工作过程　工作过程和 CYCLE81 或者 CYCLE83 基本一致，区别在于刀具在回退时，主轴必须反向旋转。

5. 直线性孔系

（1）功能　用于加工在一条直线上均匀分布的一排同样规格孔系（所有孔径、孔深完全一致）。

（2）格式　HOLES1（SPCA，SPCO，STA1，FDIS，DBH，NUM）。HOLES1 参数见表 5-8。

表 5-8　HOLES1 参数

参　　数	数据类型	含　　义
SPCA	实数	刀具起始点横坐标
SPCO	实数	刀具起始点纵坐标
STA1	实数	起始角度
FDIS	实数	起始点到第一孔距离（无符号输入）
DBH	实数	相邻两孔之间距离（无符号输入）
NUM	实数	孔的数量

（3）含义　SPCA、SPCO 是孔系加工前刀具的坐标。STA1 是所有孔所在直线与孔系所在平面第一轴正向之间的夹角，取值范围：$-180° \sim 180°$。

（4）示例　加工如图 5-69 所示均匀分布的四个浅孔，工件上表面为 *XY* 平面，孔深为 6mm。

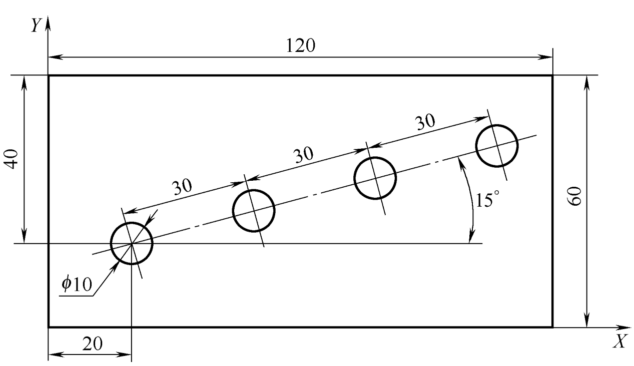


图 5-69　HOLES1 加工示例

主要程序如下：

…

N120 G0 X20 Y20;　　　　　　　　刀具快速定位到第一个孔位置

N130 MCALL HOLES1（20，20，15，0，30，4）;

孔系循环开始，由于第一个孔位置就是刀具起始位置，因此起始位置到第一个孔距离为 0，孔系直线与 *X* 轴正向夹角为 15°，孔的数量为 4。

N140 CYCLE81（5，0，1，-6，0）;　　　　孔系为浅孔

N150 MCALL;　　　　　　　　循环结束

…

注意：在孔系加工循环中，必须要使用模态调用指令 MCALL。其用法是后接指令或者循环表示某种模态开始，单独为一个程序段则表示模态的结束，因此一般 MCALL 是成对出现的。

6. 圆弧孔系

（1）功能　用于加工在一圆弧上均匀分布的同样规格孔系（所有孔径、孔深完全一致）。

（2）格式　HOLES2（SPA，SPO，RAD，STA1，INDA，NUM）。HOLES2 参数见表 5-9。

表 5-9　HOLES2 参数

参　　数	数据类型	含　　义
SPA	实数	孔系圆心横坐标
SPO	实数	孔系圆心纵坐标
RAD	实数	孔系半径（无符号输入）
STA1	实数	第一个孔中心和孔系圆心连线与横坐标正向之间的夹角
INDA	实数	相邻两孔之间夹角（无符号输入）
NUM	实数	孔的数量

（3）含义　所谓孔系圆是指孔的中心所在的圆。STA1 取值范围：－180°～180°。INDA 是相邻两孔中心与圆心连线之间的夹角。

（4）示例　加工如图 5-70 所示均匀分布的五个浅孔，工件上表面为 *XY* 平面，孔深为 10mm。

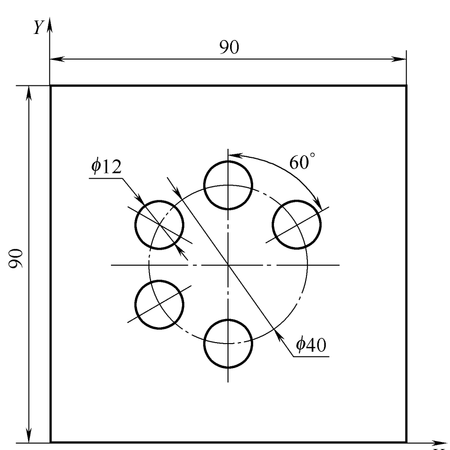


图 5-70　HOLES2 加工示例

主要程序如下：

```
…
N130 MCALL HOLES2（45，45，20，30，60，5）；    孔系循环开始
N140 CYCLE81（4，0，1，－10，0）；              孔系为浅孔
N150 MCALL；                                    循环结束
…
```

7. 矩阵孔系

（1）功能　用于加工同样规格的矩阵孔系（所有孔径、孔深完全一致）。

（2）格式　CYCLE801（SPCA，SPCO，STA1，DIS1，DIS2，NUM1，NUM2）。CYCLE801 参数见表 5-10。

表 5-10　CYCLE801 参数

参　　数	数据类型	含　　义
SPCA	实数	刀具起始点横坐标
SPCO	实数	刀具起始点纵坐标
STA1	实数	起始角度
DIS1	实数	列间距离
DIS2	实数	行间距离
NUM1	实数	行数
NUM2	实数	列数

（3）示例　加工如图 5-71 所示均匀分布的四列浅孔，工件上表面为 *XY* 平面，孔深为 12mm。

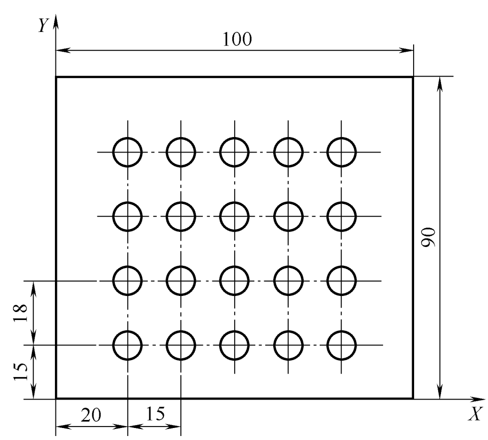


图 5-71　CYCLE801 加工示例

主要程序如下：

```
…
N120 G0 X20 Y15;
N130 MCALL CYCLE801 (20, 15, 0, 15, 18, 5, 4);     孔系循环开始
N140 CYCLE81 (5, 0, 1, -12, 0);                    孔系为浅孔
N150 MCALL;                                        循环结束
…
```

8. 平面铣削循环

（1）功能　用于加工较大矩形平面。

（2）格式　CYCLE71（RTP，RFP，SDIS，DP，PA，PO，LENG，WID，STA，MID，MIDA，

FDP，FALD，FFP1，VAR1，FDP1）。CYCLE71 参数见表 5-11。CYCLE71 参数示意如图 5-72 所示。

表 5-11　CYCLE71 参数

参　　数	数 据 类 型	含　　义
RTP	实数	返回平面位置坐标
RFP	实数	参考平面位置坐标
SDIS	实数	安全距离（无符号输入）
DP	实数	加工深度位置坐标
PA	实数	起始点横坐标
PO	实数	起始点纵坐标
LENG	实数	矩形在第一轴上的长度（无符号输入）
WID	实数	矩形在第二轴上的长度（无符号输入）
STA	实数	矩形倾斜角度，取值范围为：$0° \leqslant STA < 180°$
MID	实数	最大铣削深度（无输入符号）
MIDA	实数	吃刀宽度（无输入符号）
FDP	实数	吃刀方向的返回移动（无输入符号）
FALD	实数	粗加工模式下的精加工留量（无输入符号）
FFP1	实数	平面铣削的进给速度
VARI	整数	加工类型
FDP1	实数	超越距离（无输入符号）

（3）含义　MID 表示最大铣削深度，若 MID = 0，则一次铣削到位。VARI 由两位数构成，个位可取 1 或者 2，分别表示粗加工、精加工。十位可取 1、2、3、4，分别表示：平行于横坐标，单一方向铣削；平行于纵坐标，单一方向铣削；平行于横坐标，往复铣削；平行于纵坐标，往复铣削。如：VARI = 41 表示进行平行于纵坐标，往复粗加工铣削。

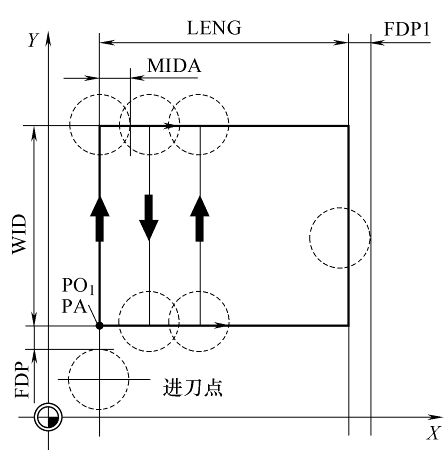


图 5-72　CYCLE71 参数示意

9. 轮廓铣削

（1）功能　用于铣削各种内外轮廓。

（2）格式　CYCLE72（KNAME，RTP，RFP，SDIS，DP，MID，FAL，FALD，FFP1，FFD，VARI，RL，DM2，AS1，LP1，FF3，AS2，LP2）。CYCLE72 部分参数见表 5-12。

表 5-12　CYCLE72 部分参数

参　数	数据类型	含　义
KNAME	字符串	轮廓子程序名
MID	实数	最大切入深度（无符号输入）
FAL	实数	轮廓精加工余量（无符号输入）
FALD	实数	底部精加工余量（无符号输入）
FFP1	实数	轮廓铣削的进给速度
FFD	实数	深度方向进给速度
VARI	整数	加工方式
RL	整数	轮廓铣削时的刀补方向
DM2	实数	终点处螺纹的直径
AS1	整数	铣削切入方式
LP1	实数	每次切入工件直线长度或者圆弧半径
FF3	实数	两次铣削之间的进给速度
AS2	整数	铣削退出方式
LP2	实数	每次退出工件直线长度或者圆弧半径

（3）含义　未列出的参数含义与 CYCLE71 循环含义和用途一致。VARI 是指加工方式，由三位数组成：个位值取值 1、2 分别表示粗加工、精加工；十位数表示铣削完成一次后重新进入铣削中间定位过程，取值 0、1，分别表示中间定位过程采用 G0、G1 方式；百位数表示铣削完成一次后重新进入铣削中间定位过程中是否要退刀，取值分别为 0（回到返回平面 RTP）、1（回到安全平面，即参考平面上方安全距离处）、2（回退安全距离）、3 不退刀。

AS1、AS2 是指每次刀具切入、切出的方式。都由两位数组成：个位取值 1、2、3，分别表示切入方式为直线切入、1/4 圆切入、半圆切入；十位取值 0、1，分别表示平面进给（切入时先进给 Z 轴，再进给 X、Y 轴，切出相反）、空间进给（切入、切出都采用三轴联动方式）。

5.4.4　典型铣削编程综合实例

如图 5-73 所示工件已完成初加工，材料为 45 钢，按要求完成凸台轮廓以及孔加工（不用加工内轮廓）。

1. 零件图工艺分析

该零件需要进行平面铣削、凸台铣削、方形凹槽铣削、圆形凹槽铣削、中心孔钻削、螺纹底孔钻削、攻螺纹等内容才能完成整个数控加工。图样尺寸完整，可以计算出各基点坐标。

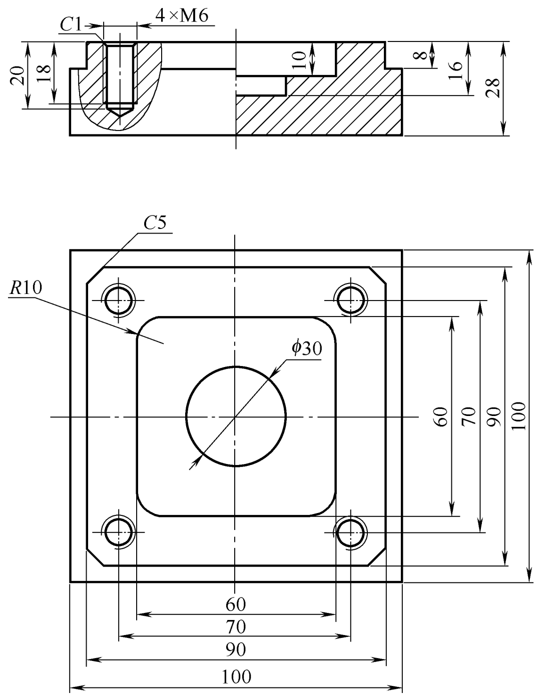


图 5-73　SINUMERIK 840D 数控铣削编程实例

2. 工艺文件

数控加工工艺文件既是数控加工、产品验收的依据，也是操作者必须遵守、执行的规程，还是编程人员在编制加工程序单时必须编制的技术文件。

（1）编程任务书　用以阐明工艺人员对数控加工工序的技术要求、工序说明、数控加工前应该留有的加工余量。是编程人员与工艺人员协调工作和编制数控加工程序的重要依据之一。

（2）数控加工工件安装和零点设定卡　此表卡的作用，在于表达数控加工零件的定位方案和夹紧方法，并应标明被加工零件的零点位置和坐标方向，以及使用的夹具名称、编号等。由于本工件尺寸不大，形状规则，完全可以采用机用虎钳装夹。

（3）数控加工工序卡　数控加工工序卡与普通加工工序卡相似之处是由工艺人员根据被加工零件，编制数控加工的工艺内容；与普通加工工序卡不同的是，此卡中还应该反映使用的辅具、切削参数、切削液等。它是操作人员用数控加工程序进行数控加工的主要指导性工艺文件。工序卡应该按照已经确定的工步顺序填写（表 5-13）。

被加工零件的工步较少或工序加工内容较简单时，此工序卡也可以省略。但此时应该将工序加工内容填写在数控加工工件安装和零点设定卡上。

（4）数控加工刀具卡　数控加工刀具卡要求反映刀具号、刀具刀称、刀柄型号、刀具规格及材料或牌号等（表 5-14）。它是组装数控加工刀具和调整数控加工刀具的依据。

在数控车床、数控铣床上进行加工本实例零件时，由于使用的刀具不多，此刀具卡可以省略。

表 5-13　数控加工工序卡

（单位）	数控加工工序卡			产 品 名 称	产 品 代 号	零 件 名 称	零 件 图 号
						基座	
工序图（略）				工序号	工序名称	设备名称	设备型号
						加工中心	
				夹具编号	夹具名称	材料名称	材料牌号
					机用虎钳		45
				程序编号	切削液	工时	车间
工步号	工步内容	刀具号	刀具规格 /mm	主轴转速 /(r/min)	切削速度 /(mm/min)	背吃刀量 /mm	备注
1	平面铣削	T1	ϕ40	800	80	2	
2	凸台铣削	T1	ϕ40	800	100	3	
3	中心孔钻削	T5	ϕ10	1000	100		
4	螺纹底孔钻削	T7	ϕ5	800	100		
5	攻螺纹	T9	M6	400	400		
	设计	日期	校对	日期	审核	日期	共 1 页
							共 1 页

表 5-14　数控加工刀具卡

（单位）	数控加工刀具卡				产品名称	产品代号	零件名称	零件图号
							基座	
设备名称	加工中心	设备型号		工序号		工序名称		程序编号
工步	刀具号	刀具名称	刀柄型号	刀具规格		刀片		备注
1	T1	平面铣刀	SK40	ϕ40				
2	T3	中心钻	SK40	ϕ10				
3	T5	麻花钻	SK40	ϕ5				
4	T7	丝锥	SK40	M6				
		设计	日期	校对	日期	审核	日期	共 1 页
								共 1 页

（5）数控机床调整卡　数控机床调整卡是机床操作人员在数控加工前调整机床的依据。主要包括机床控制面板开关调整、数控加工零件安装、零点设定、刀具补偿设置等内容。

简单数控加工此卡可以简化，也可以省略。但必须将上述内容要求填写在数控加工工件安装和零点设定卡上。

（6）机床刀具运行轨迹图　机床刀具运行轨迹图是编程人员进行数值计算、编制程序、审查程序和修改程序的主要依据。

（7）数控加工程序单　数控加工程序单是编程人员根据工艺分析情况，经过数值计算，按照数控机床规定的指令代码，根据运行轨迹图的数据处理而编写的数控加工程序。

但是需要注意的是，不同单位对数控加工工艺文件的一些具体的格式与要求可能是不同的。

3. 加工程序：

主程序

```
A03. MPF;
N010 G54;
N020 T1 D1 M6;
N030 S800 M3 F100;
N040 CYCLE71 (3, 1, 1, -50, -50, 125, 105, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 11, 0);
N050 CYCLE72 ("L03", 3, 1, -8, 3, 0, 0, 100, 50, 201, 41, 2, 25, 100, 2, 25);
N060 T3 D1 M6;
N070 S1000 M3 F100;
N080 MCALL CYCLE81 (3, 1, -3.5, 0);
N090 CYCLE801 ( -35, -35, 0, 70, 70, 2, 2);
N100 MCALL;
N110 T5 D1 M6;
N120 S800 M3 F100;
N130 MCALL CYCLE83 (3, 0, 1, -20, 0, -10, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 3, 5, 0, 0, 0);
N140 CYCLE801 ( -35, -35, 0, 70, 70, 2, 2);
N150 MCALL;
N160 T5 D1 M6;
N170 MCALL CYCLE84 (3, 0, 1, -18, 0, 0, 3, 0, 1, 0, 400, 600, 3, 1, 0, 1, 6, 0);
N180 CYCLE801 ( -35, -35, 0, 70, 70, 2, 2);
N190 MCALL;
N200 M30;
```

子程序

```
L03. SPF
G1 X-45 Y0;
Y40;
X-40 Y45;
X40;
X45 Y40;
Y-40;
X40 Y-45;
X-40;
X-45 Y-40;
Y2;
M17;
```

【知识拓展】

随着数控技术的发展，先进的数控系统不仅为用户编程提供了一般指令代码，如 G、M 指令等，而且为编程者提供了扩展数控功能的手段——宏程序，如 FANUC、SIEMENS 等数控系统的宏程序与参数编程。

所谓宏程序其实质与子程序相似，就是以变量的组合，通过各种算术和逻辑运算，转移和循环等命令，编制的一种可以灵活运用的程序，只要改变变量的值，即可以完成不同的加工和操作。可以完成不同的加工和操作。用宏程序可以简化程序的编制，提高工作效率，实现普通编程难以实现的功能。

【本章小结】

本章以数控铣床和加工中心编程为主，有针对性地描述了数控铣床和加工中心的基本结构、工作性能和加工特点，分析了刀具的种类、使用范围、生产注意事项，并结合实例对其加工工艺的编制、流程、方法，做了详细的阐述。

通过本章的学习，应当了解数控铣床和加工中心的以下编程特点：

1）数控铣主要用于加工平面类、变斜角类、曲面类、箱体类零件。数控铣床在加工过程中实际是通过控制刀具中心轨迹来实现铣削加工的，因此运用刀具半径补偿功能来补偿一个刀具半径，在建立刀具半径补偿时建立刀补的距离必须大于刀具半径，且建立与取消刀补必须在 G01 和 G00 上进行。

2）数控加工中心的编程。数控加工中心主要用于加工形状复杂、工序多、精度要求比较高的工件。数控加工中心与数控车床、数控铣床最大区别在于数控加工中心有刀库和自动换刀装置。不同规格的加工中心拥有不同数量刀具的刀库，故刀具从刀具库转到换刀位所需要的时间有长有短，因此在编写换刀指令时也比较灵活。通常情况下在编写加工中心加工程序时应以工序集中原则进行编写。

3）在对曲线轮廓直接入刀时稍不注意便会引起过切，所以找到合适的切入点至关重要；因退刀和进刀位置不一致，会导致少切，这就要求不能产生切痕，一旦出现就要采取措施消除切痕；如果在加工时忽视了先主后次、先粗后精的基本原则，会使得产品不合要求，从而产生大量的残次品，导致材料的大量浪费。

思考题与习题

5-1 数控铣床的组成及其作用。

5-2 数控铣床主轴准停装置的作用是什么？准停装置有哪些类型？

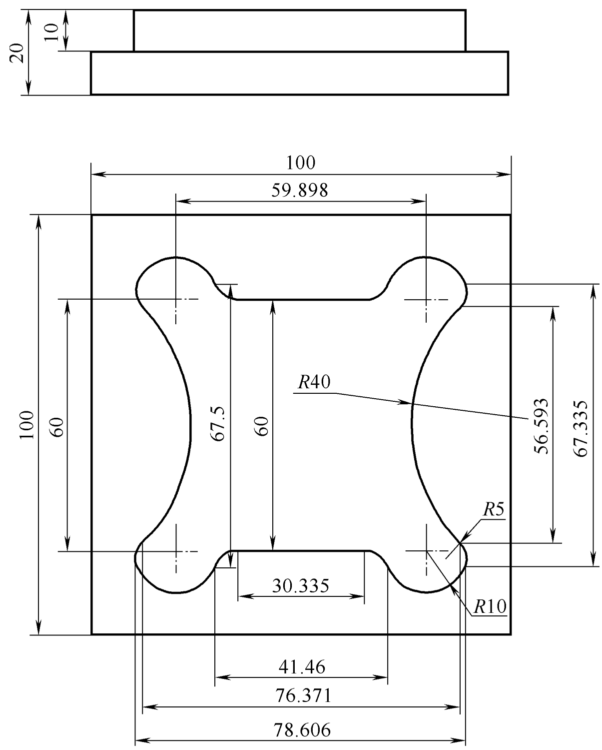
5-3 滚珠丝杠副的特点是什么？有哪些间隙调整方式？

5-4 数控铣床（加工中心）的主要加工对象有哪些？

5-5 数控铣床（加工中心）上使用的刀具有哪些？

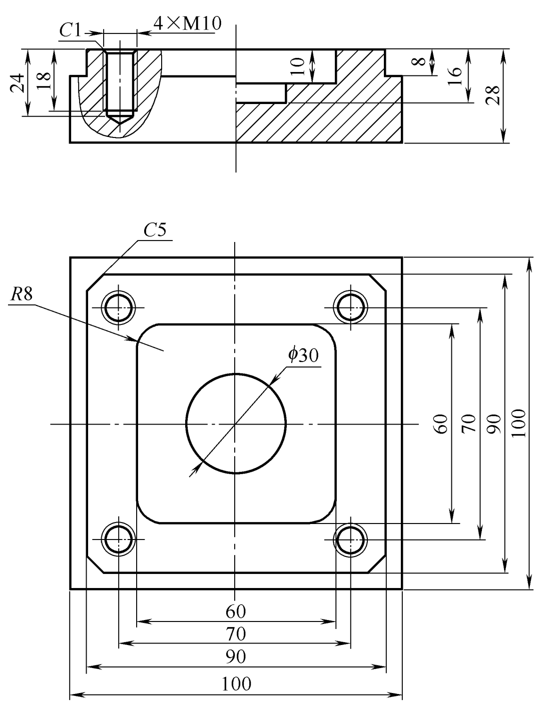
5-6 顺铣和逆铣的区别是什么？

5-7 根据图 5-74 所示图样编写数控加工程序。



20
10
100
59.898
100
60
67.5
60
R40
56.593
67.335
R5
R10
30.335
41.46
76.371
78.606

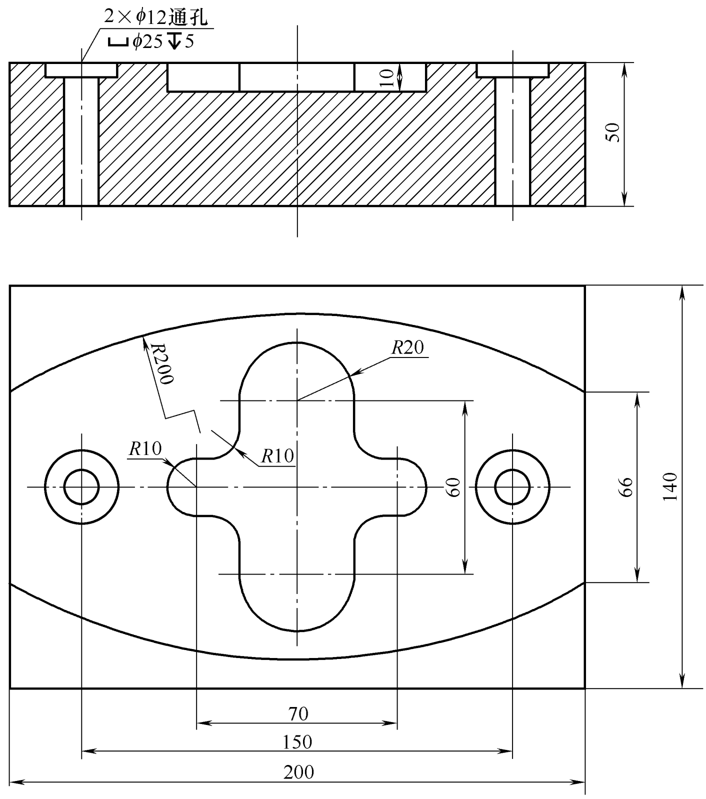
a)



C1
4×M10
24
18
10
8
16
28
C5
R8
φ30
60
70
90
100
60
70
90
100

b)

图5-74　习题5-7



c)

图 5-74　习题 5-7（续）

第 6 章　数控机床计算机辅助编程

【知识要点】

1. 计算机辅助编程的步骤。
2. MasterCAM 数控编程的基本方法。
3. MasterCAM 系统相关性及其应用。
4. MasterCAM 系统中 2.5 轴和曲面加工的特点和实例。

6.1　计算机辅助编程简介

6.1.1　计算机辅助编程概述

数控编程的方法有手工编程和自动编程两种。手工编程指零件图纸分析、工艺过程分析、工艺路线和参数的确定、刀位轨迹坐标数据的计算、零件数控加工程序的编写、程序的检验等零件数控加工程序编制的全部过程和各个步骤，均由人工来实现。这种方法只适用于结构、刀具路径及计算过程都较简单的零件。通过手工编程实现的程序，出错率高、效率低；一般编程时间与加工时间之比为 30∶1；且计算精度低。

对于零件工艺内容多，编程工作量大，容易出错，或者零件工艺内容不是很多，但是形状较复杂，手工编程方法几乎无法解决的数控编程问题，自动编程就具有很大的优势。自动编程指工艺过程分析、工艺路线和参数的确定、刀位轨迹坐标数据的计算、零件数控加工程序的编写等过程和步骤均利用计算机来完成。用计算机代替人完成计算量大、重复以及复杂计算等工作。自动编程分为程序语言自动编程、图形交互式自动编程、其他输入方式的编程。随着计算机图像处理能力的不断增强，图形交互式计算机辅助编程方式已成为目前数控编程的主要方法之一。其主要特点是以图形要素为输入方式，即通过三维软件进行几何建模或三维造形。数控程序的生成是通过编程人员在计算机上应用交互的方式，选择需要加工的几何要素，然后通过对话框进行交互对话，设定相关的加工参数，待设定完成确认以后，计算机能够自动地生成数控加工程序代码。同时，还可以进行加工仿真。

6.1.2　计算机辅助编程的步骤

为适应复杂形状零件的加工、多轴加工、高速加工，计算机辅助编程的一般步骤为：

1）零件的几何建模。利用三维软件系统，进行零件几何模型创建。

2）工艺规程和工序内容的确定。按照零件的要求、设备能力以及环境条件，为零件制定合理工艺规程和工序内容。

3）刀具轨迹生成。计算机利用 CAD 软件提供的零件模型与信息，CAPP 提供的工艺规程和工序内容，自动进行刀位坐标计算，并生成刀具轨迹。刀具轨迹生成是复杂形状零件数控加工中最重要的内容。

4）数控加工仿真。数控加工仿真通过 CAM 软件模拟加工环境、刀具路径与材料切除过程来检验并优化加工程序，具有柔性好、成本低、效率高、安全可靠等特点，是提高编程效率与质量的重要措施。

5）后置处理。它将前置处理生成的刀位数据转换成适合于具体机床数据的数控加工程序。包括机床运动学建模与求解、机床结构误差补偿、机床运动非线性误差校核修正、机床运动的平稳性校核修正、进给速度校核修正及代码转换等技术内容。

6.1.3　计算机辅助编程软件

常见的计算机辅助编程软件有 MasterCAM、UG、Creo、CATIA 等，而 MasterCAM 是一款经济、实用的软件系统，可以高效地实现数控程序的编写，其软件功能模块众多，包括铣、车等模块。在国内外 CAD/CAM 领域，MasterCAM 是微型计算机平台上装机量最多、应用最广泛的软件，已成为 CAD/CAM 系统的行业标准软件。MasterCAM 具有强大、稳定、快速的特点，不论是在设计制图上，还是数控铣床、车床和线切割等加工上，都能获得很好的效果，而且 MasterCAM 能够兼容 PC 平台配合 Microsoft Windows 操作系统，支持中文操作，让用户在软件操作上更加便捷，并且对硬件设备的要求不高，在美国、日本、德国等工业大国普遍使用。本章将对 MasterCAM 进行详细介绍。

6.2　MasterCAM 数控编程

MasterCAM 是一套全方位服务于制造业的软件，包括铣削、车削、实体、木雕、浮雕、线切割等模块。铣削功能模块用于生成和管理铣削加工刀具路径，输出数控加工代码；车削功能模块用于生成和管理车削加工刀具路径，输出数控加工代码；实体功能模块用于创建二维及三维工程图形，它具有全特征化造型功能和强大的图形编辑、转换功能；木雕功能模块能生成和管理木雕刀具路径，输出数控加工代码；浮雕功能模块用于生成和管理浮雕刀具路径；输出数控加工代码；线切割功能模块生成和管理线切割刀具路径；输出数控加工代码。

MasterCAM 还可以通过“刀路模拟”和“实体验证”对生成的刀具轨迹及时进行干涉检查，用图形动态方式检验加工代码的正确性。通过后置处理可获得符合某种数控系统需要和使用者习惯的数控程序；也可以通过计算机的串口或并口与数控机床连接，将生成的数控代码传输给数控机床。

6.2.1　MasterCAM 的基本操作

MasterCAM 具有很多的功能，其中有些功能可能是很少用到的，而另外一些则是经常用到的，这些常用功能是每个软件使用者都应该掌握的。

MasterCAM 9.1 的操作界面及操作方法与 MasterCAM 9.0、MasterCAM 8 基本相同，对于基本操作的这一部分是完全相同的。本书的讲述将以 MasterCAM 9.1 为基础，同时兼顾 MasterCAM 9、MasterCAM 8 的用法。

1. MasterCAM 的界面介绍

MasterCAM 典型的操作界面如图 6-1 所示，可以进行个性化定制，对绘图区背景颜色等进行设置。另外在操作时界面上可能会按操作的具体情况弹出窗口，如单击鼠标右键会弹出快捷菜单，而在进行刀具路径编制时会弹出刀具路径参数设置对话框，在进行刀具路径管理时还会出现刀具路径操作导航器窗口等。

进入 MasterCAM，其工作界面由主功能表、辅助功能菜单、信息提示区、绘图区、标题栏、工具栏等构成，如图 6-1 所示。

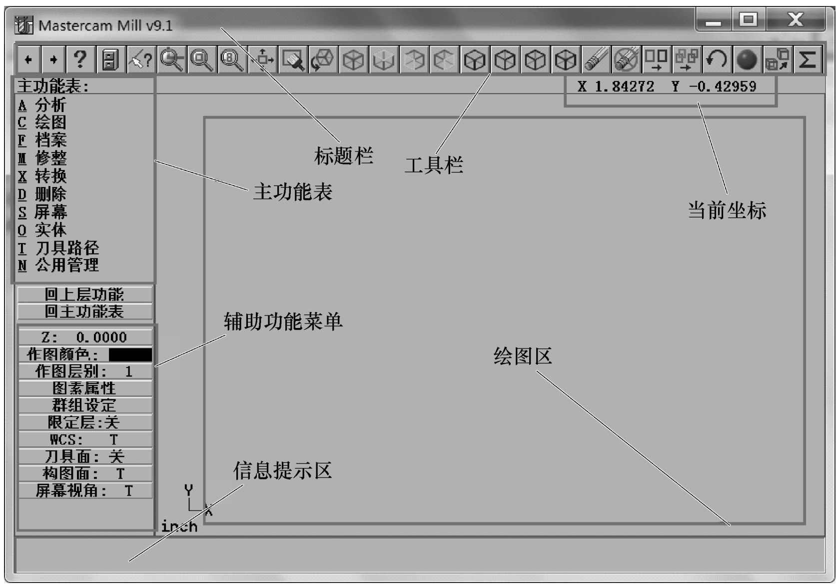


图 6-1　MasterCAM 的工作界面

2. MasterCAM 的基本操作

（1）取消命令　MasterCAM 取消命令的方法有以下 3 种：

1）单击主功能表区的“回主功能表”选项；退出命令并返回尚未选择命令的状态，即原始的状态，信息提示区出现“主功能表”字样。

2）单击主功能菜单区的“回上层功能”选项或按键盘上的 Esc 键，返回上级菜单，退出当前命令。

3）选择其他功能替代当前功能，即鼠标左键直接选择工具条的其他命令，自动取消前一命令，并执行现在所选的命令。

（2）撤销操作　MasterCAM 在命令操作时对于所做的错误操作可以进行回退取消，单击工具栏上“撤销”按钮，可以将最近一次所绘制的图形取消或者将最近一次编辑、变换操作取消。

（3）参数设置　MasterCAM 的参数设置可以分成两种，一种是在主功能表及信息提示区上输入参数完成参数的设置，另一种是在弹出的参数对话框中进行参数的设定。MasterCAM 在很多情况下使用对话框的方式进行参数的设置，其主要用于绘图或刀具路径生成时各项参数的设置。

（4）屏幕操作　单击工具栏中按钮，可对屏幕显示区进行放大或缩小操作。

（5）选择对象　选择好对象才能进行编辑、变换、删除及其他操作。为了更快捷地选择所需要的对象，在图形编辑过程中，MasterCAM 可以调用如图 6-2 所示的对象选择对话框来进行对象的选择（某些命令只包含其中的一部分选项），当系统提示选择对象时，

可以使用鼠标依次单击要选择的对象上的任一点来选择该对象。以下对各个选项逐一说明。

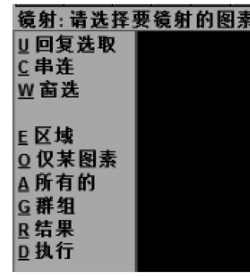


图 6-2　对象选择对话框

1）回复选取。用于将已选择的图像元素变成未选择的图像元素。

2）串连。用于选择串连在一起的一组对象。

3）窗选。该选项通过定义一个窗口来选择对象，选择此选项后，在主功能表显示窗口选择子菜单。窗口可以是矩形的也可以是多边形的，并在系统提示区显示出当前窗口的设置类型。

4）区域。该方法通过选择封闭区域内的一点即可实现对象的选择。采用区域选择时，所选择的点必须是封闭区域内的点，否则，系统自动返回物体选择子菜单。该方法常用在绘制阴影线或选择挖槽加工几何对象时的对象选择。

5）仅某图素。此选项用于选择某一特定类型属性的对象，主要用于在对象密集的地方进行对象的选择。系统提供了 6 种对象的类型（点、直线、圆弧、曲线、曲面、实体）及 3 种对象的属性（颜色、图层和限定）供用户选择，当选择了某一类型或属性后，只有该类型或属性的对象才能被选择，而其他类型或属性的对象将不能被选择。

6）所有的。此选项可用来选择所有含有某一特定类型或属性的对象。与“仅某图素”选项相同，系统也提供了 6 种对象的类型（点、直线、圆弧、曲线、曲面、实体）及 3 种对象的属性（颜色、图层和限定）供用户选择。但用户可以通过选择某一物体来选择与该物体具有相同类型或属性的所有的几何对象。

7）群组。此选项用来选择当前设定为群组的对象。用户可以在群组对话框中选择群组列表中的一个或多个群组，即可选择各群组包含的所有对象。系统直接将最近一次转换操作的结果以及该操作中选择的对象也作为群组。

（6）显示设置　用于设置几何对象在绘图区的显示方式，包括有实体显示、全时着色及隐藏显示等命令。

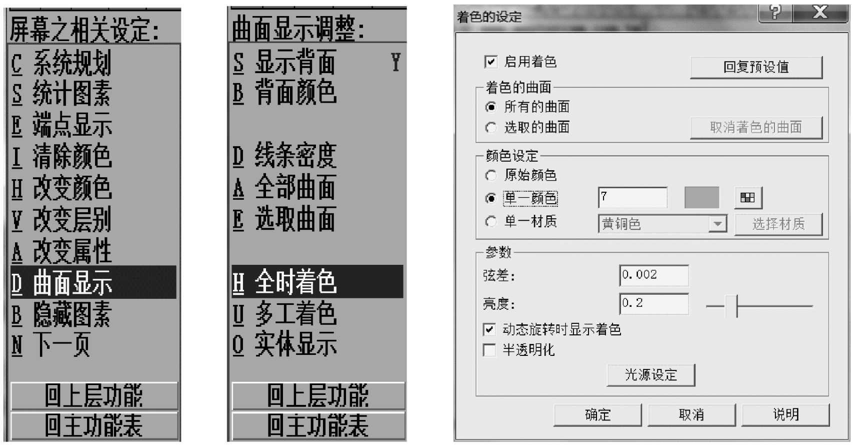
1）曲面显示。单击主功能表中的“屏幕”→“曲面显示”命令，系统在主功能菜单区弹出曲面子菜单，如图 6-3 所示。

2）着色显示。着色显示可以更直观地显示一个图形。通过着色显示，对于三维造型的曲面和实体而言，有很强的立体感，可以产生某些产品的真实外形的感觉，如图 6-4b 所示。单击曲面显示选项中的“全时着色”选项或者单击工具栏中的按钮，在弹出的着色设置对话框里（图 6-3c）选中“启用着色”选项，系统将对曲面按设置参数进行着色显示。在对话框中可以设置着色的曲面和实体、着色的颜色以及着色的显示参数，包括弦差、亮度、透明设置等。

3. MasterCAM 的基本图形构建

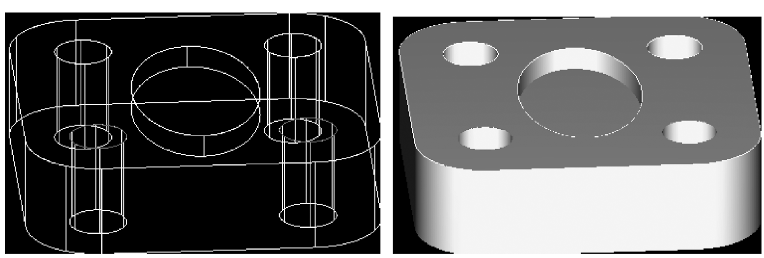
MasterCAM 是一个集成的 CAD/CAM 软件，具有较为强大的 CAD 设计造型能力。使用 MasterCAM 可进行基本图形的构建，基本图形主要包括点、直线、圆弧、矩形以及样条曲线等，本节主要从点、直线、圆弧、矩形的绘制四个方面对基本图形构建做解释。

（1）点的绘制　点的构建常用于定义图形的位置，如直线的端点、圆弧的圆心点等。点的构建步骤为：在主功能表中单击“绘图”→“点”命令，弹出如图 6-5 所示的“点”菜单，用于实现多种类型点的绘制。



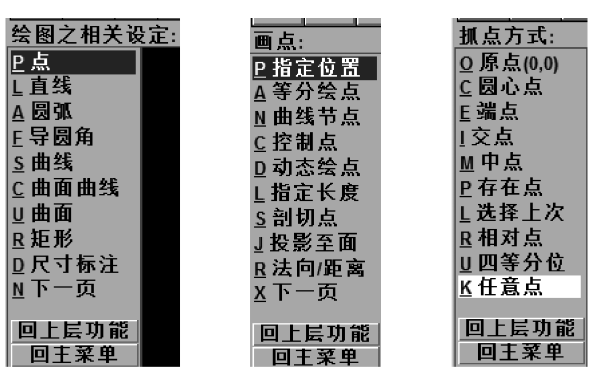
a) b) c)

图 6-3　曲面显示菜单



a) b)

图 6-4　着色显示



a) b) c)

图 6-5　“点”菜单

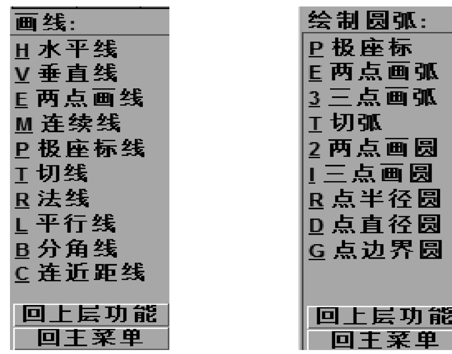
以指定位置点为例绘制在指定位置上的点，可以绘制原点、圆心点、端点、交点等指定点。指定点的位置，可以通过键盘直接输入点的坐标值，输入时必须先输入 X 坐标值，加一逗号，再输入 Y 坐标值，若一个点的 X、Y 坐标均为 12，则点的输入坐标为

（12，12）。也可以输入“X”加 X 坐标值，“Y”加 Y 坐标值，在其中不需要加逗号，如“X12Y12”。

（2）直线和圆弧的绘制　用户可通过在主功能表上分别单击“绘图”→“直线”和“绘图”→“圆弧”命令，绘制直线和圆弧（图 6-6）。

直线的绘制：在“直线”子菜单中选取相应选项，则可绘出水平线、垂直线、两点画线、连续线、极坐标线等所需要的直线。

圆弧的绘制：在“圆弧”子菜单中选取相应选项，即可绘制出满足条件需要的圆或圆弧。



a)　　b)

图 6-6　“直线”和“圆弧”子菜单

（3）矩形的绘制　“矩形”命令可以用于生成一个矩形。MasterCAM 的矩形构建功能可以绘制多种形状的矩形，包括一般矩形、带圆角的矩形、键槽形、（单）“D”形、双“D”形、椭圆形等各种形状。在主功能表中单击“绘图”→“矩形”命令，弹出“矩形”子菜单，如图 6-7 所示。在菜单中有“一点”构建矩形和“两点”构建矩形；当选择“一点”构建矩形时，需要指定其长度和宽度并指定点所处的位置。单击“一点”（图 6-7），将弹出图 6-8 所示的“绘制矩形”对话框，在对话框里设置矩形的宽度（Width）、高度（Height）及点的位置（Point Placement）。确定参数后，在绘图区指定一点，完成矩形的构建。当选择“两点”构建矩形时，需要指定 2 个对角点完成矩形的构建。

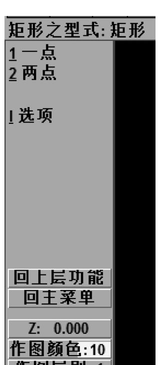


图 6-7　“矩形”子菜单

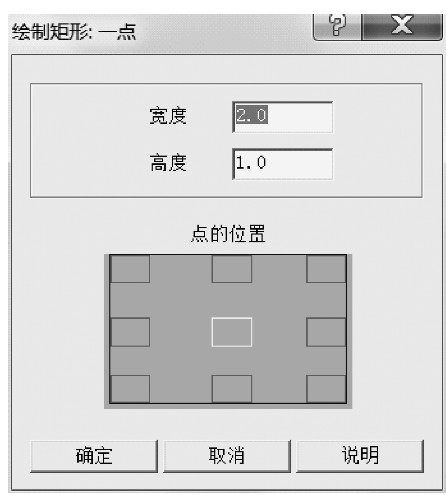


图 6-8　“绘制矩形”对话框

另外还有“选项”命令（图 6-7），可以对矩形的形状进行设置，如图 6-9 所示。在对话框中还有“角落导圆角”选项，激活该选项，可以设置矩形自动倒圆角。“旋转”选项确定是否需要把矩形旋转指定的角度；“产生曲面”选项确定是否需要同时构建出曲面；“产生中心点”选项确定是否在所构建的中心点处绘制点。



图 6-9 “矩形的选项”对话框

MasterCAM 除能完成以上基本图形的绘制外，还能实现椭圆的绘制、正多边形的绘制、倒角及倒圆的绘制、样条曲线的绘制等其他基本图形的绘制。

6.2.2 MasterCAM 中几何图形的修整和变换

在绘制复杂零件的几何图形时，仅使用基本绘图命令是不够的。为了提高绘图效率，还应熟悉几何图形的修整和变换操作命令。

1. 删除

删除功能可用于从屏幕或系统的资料库中删除一个或一组图形。在主功能表中或者工具栏菜单中单击“删除”命令或按 F5 功能键，选取相应的选项便可选择删除指定的图形，并可实现指定图形的删除，同时通过“删除”菜单，可以删除系统中所有的重复图形，也可以恢复单一图形、指定数量以及所有图形等已经完成删除的图形。

2. 修整

修整功能可用于修改已绘出的图形。具体操作时可按键盘的 F7 键或在主功能表中单击“修整”命令，系统将弹出如图 6-10a 所示的修整菜单，选取相应选项便可进行图形的倒圆角、修剪延伸、打断、连接、正向切换、控制点、转成 NURBS 等形式的修改。在“修整”子菜单上选取“修剪延伸”或者“打断”选项，系统弹出如图 6-10b、c 所示的“修剪/延伸”和“打断”子菜单。

（1）修剪延伸　单击主功能表上“修整”→“修剪/延伸”命令，弹出如图 6-10b 所示的“修剪/延伸”子菜单，选取某种修剪方式对所选取的图形进行修剪。

（2）打断　单击主功能表“修整”→“打断”命令，弹出如图 6-10c 所示的“打断”子菜单，选取其中某项方式便可以对所选取的图形进行打断操作。

3. 转换

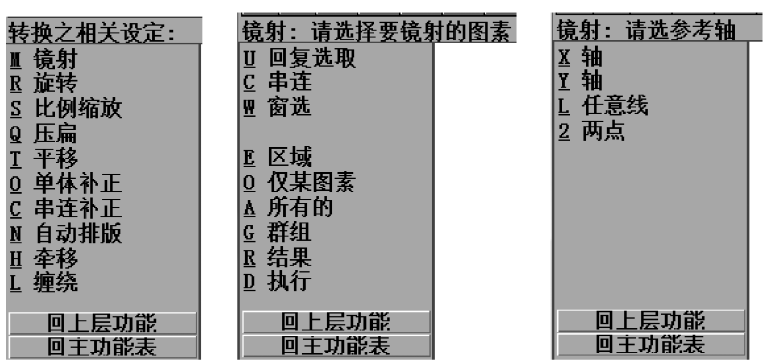
图形的转换功能可以通过对已绘制的几何图形进行位置、方向或大小的变换，得到新的几何图形。主要包括“镜射”“旋转”“比例缩放”“压扁”“平移”“单体补正”“串连补正”“自动排版”“牵移”“缠绕”等功能。在主功能菜单区单击“转换”选项，弹出如图 6-11a 所示的“转换”菜单，可从中选择“镜射”“旋转”“比例”“平移”等命令来改



a)　　b)　　c)

图 6-10　“修整”命令

变几何图形的位置、方向和大小。



a)　　b)　　c)

图 6-11　“转换”菜单

（1）镜射　即镜像，在主功能表中，单击“转换”→“镜射”命令，选取需镜像的图形后，单击“执行”完成图形选择，如图 6-11b 所示；在弹出如图 6-11c 所示对话框中选取 X 轴、Y 轴、任意线或两点作为参考的镜像轴线；选择参考轴后，在弹出的如图 6-12 所示的“镜射”对话框中设置“操作”并确定，完成镜像图形的生成。如图 6-13a所示是处理前的图像，图 6-13b 所示是通过镜像处理后的图像。



图 6-12　“镜射”对话框

“镜射”对话框中处理方式说明：

1）操作。

① 移动，镜像后将原有图素删除。

② 复制，镜像后将原有图素保留。

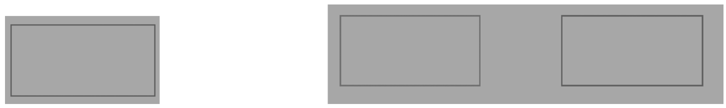
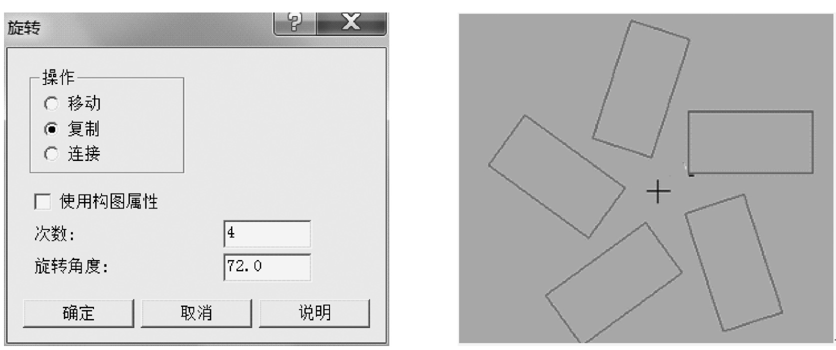

a) b)

图 6-13　图形的镜像

③ 连接，镜像后将原有图素保留并将相对应的图形用直线进行连接。

2）使用构图属性。使用构图属性是确定是否将镜射后的结果使用当前设置的图层、线型和颜色。如果激活该选项，则使用当前设置的图形属性，否则使用原图形的属性。

（2）旋转　旋转是指将所选取的图形围绕旋转基准点旋转一定的角度，并通过设置旋转次数完成所选图形的环形阵列。对图 6-13a 所示图形进行旋转，具体操作步骤为：在主功能表中单击“转换”→“旋转”命令；选取要转换的图形并单击“执行”，与镜像的操作过程一致；在指定旋转的基准点后，在弹出的如图 6-14a 所示“旋转”对话框中设置处理方式、次数、旋转角度后单击“确定”按钮，产生旋转结果，如图 6-14b 所示。



a) b)

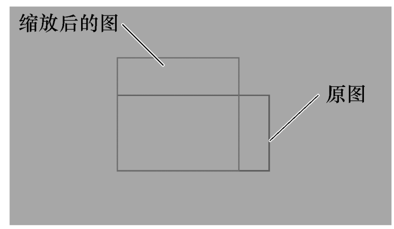
图 6-14　旋转

“旋转”对话框中参数与“镜射”对话框的参数基本相同，但多了旋转次数和旋转角度，可以进行多次的转换。当使用“连接”方式时，旋转图案的端点将被以旋转中心为圆心的圆弧连接。

（3）比例缩放　缩放可以将所选取的图形按指定的缩放基准点和缩放比例进行放大和缩小。缩放的比例可以设定为等比例缩放和不等比例缩放，分别指用户通过设置 X、Y、Z 方向的相同或不同比例值将所选取的图形进行缩放。对图 6-13a 进行缩放，具体操作步骤为：在主功能表中单击“转换”→“比例缩放”命令；选取要转换的图素并指定缩放的基准点；在弹出的如图 6-15a 所示对话框中设置“操作”“次数”“模式”后单击“确定”，产生缩放结果如图 6-15b 所示。在“缩放”比例对话框中，“操作”的设置与镜射的设置一致。在“模式”选项组中有“等比例”方式和不等比例方式。不等比例方式可分别设置 X、Y、Z 的缩放比例。要实现等比例缩放在“模式”选项组中勾选“等比例”方式。



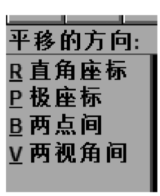
a)



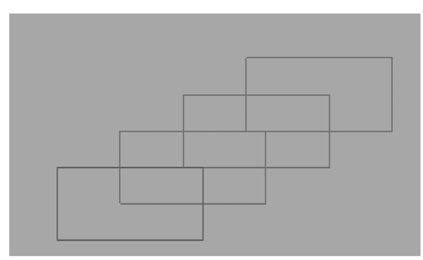
b)

图 6-15　缩放

（4）平移　平移可将所选取的图形移动或复制到新的位置。具体操作为在主功能表中单击“转换”→“平移”命令，选取需平移的图形；在“平移的方向”子菜单中选取平移参考方向选项，如图 6-16a 所示，设置相应的平移方向参数完成图像的平移，如图 6-16b 所示。



a)



b)

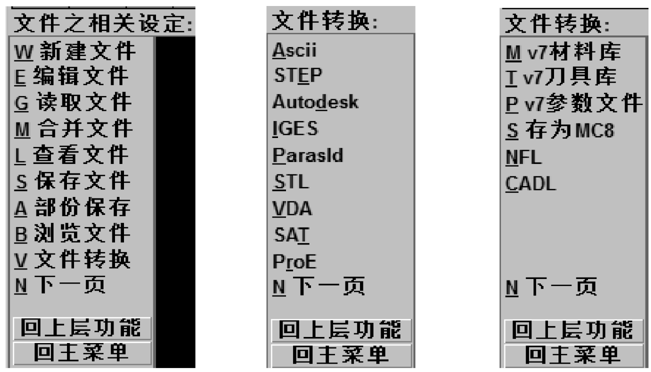
图 6-16　平移

MasterCAM 几何图形的转换功能除了以上的功能外还具有“单体补正”“串连补正”“投影”“阵列”“拖曳”“缠绕”等，在此不再赘述，读者可自行参阅相关文献。

6.3　MasterCAM 系统及其应用

6.3.1　MasterCAM 的 CAD 文件转换

单击“文件”子菜单中的“文件转换”命令，用户可将多种类型的文件读入 MasterCAM 数据库中，将它们转换为 MasterCAM 格式，也可以将 MasterCAM 文件写入多种类型的文件中。每一次操作一般可以转换一个文件，但也可以转换整个目录的文件。在“文件之相关设定”子菜单中选择“文件转换”选项，在主功能表中显示出如图 6-17 所示的“文件转换”子菜单，选择不同的选项，可以将不同类型的文件进行转换。

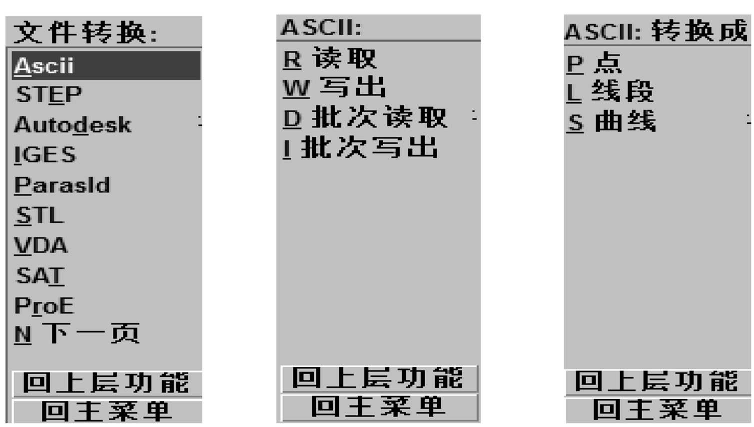


a) b) c)

图 6-17 “文件转换”子菜单

1. 导入导出 ASCII 文件

ASCII 文件为文本文件，它包含了点的 X、Y、Z 的坐标值。当 ASCII 文件中缺少 Z 坐标值时，MasterCAM 用 0 作为其默认值。ASCII 文件有多种后缀，MasterCAM 在查找文件时以“. DOC”作为其默认后缀。使用“文件转换”子菜单的 ASCII 命令可实现 ASCII 文件的导入和导出，在“文件转换”子菜单如图 6-18a 中选择“ASCII”选项后，弹出如图 6-18b 所示的“ASCII”子菜单。



a) b) c)

图 6-18 “ASCII”子菜单

2. 导入 STEP 文件

使用“文件转换”子菜单的“STEP”命令可导入 STEP 文件。在“文件转换”子菜单选择“STEP”选项，弹出“STEP”子菜单中的选项与 6-18b 所示的“ASCII”子菜单相同。该子菜单中的 4 个选项与“ASCII”子菜单中对应选项用法相同。

3. 导入导出 Autodesk 文件

使用“文件转换”子菜单的“Autodesk”命令，可实现 Autodesk 公司 AutoCAD 软件的

DWG 和 DXF 文件的导入和写出，同时还能导入 Inventor 软件的零件文件（IPT）和装配文件（IAM）。

在“文件转换”子菜单中选择“Autodesk”选项后，在主功能表中弹出的“Autodesk”子菜单的选项与图 6-18c 所示的“ASCII”子菜单相同。该子菜单中的 4 个选项与“ASCII”子菜单中对应选项用法相同。

在导入一个 Autodesk 文件时，选择一个要导入的文件以后，系统弹出如图 6-19 所示“DWG/DXF 的读档参数”对话框。下面简要说明该对话框中各选项的含义。

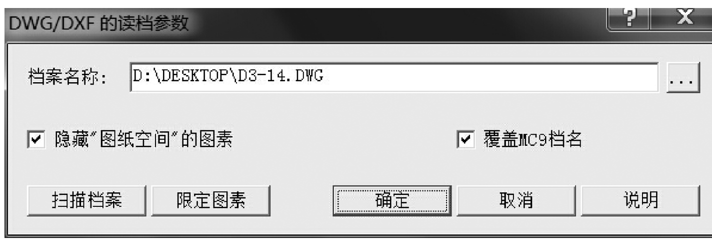


图 6-19　“DWG/DXF 的读档参数”对话框

（1）隐藏“图纸空间”的图素　当选中该复选框时，导入的图形不包括导入文件中在图纸空间上绘制的几何对象。

（2）覆盖 MC9 档名　选中该复选框时，将导入的 Autodesk 文件名作为当前 MC9 文件的文件名。在将当前 MC9 文件导出为一个 Autodesk 文件时，指定了 Autodesk 文件的类型（DWG 或 DXF）和文件名及路径后，系统弹出如图 6-20 所示“DWG/DXF 的转档参数”对话框，用户可以使用该对话框改变导出文件的文件名及路径，选择导出文件的版本。

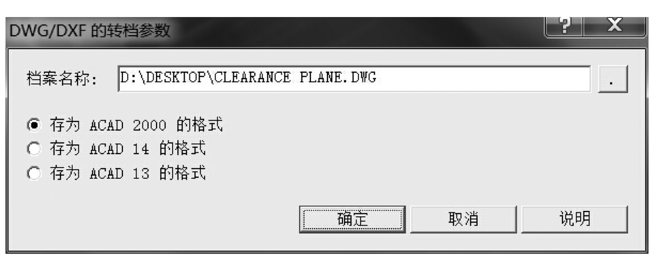


图 6-20　“DWG/DXF 的转档参数”对话框

4. 导入导出 IGES 文件

使用“文件转换”子菜单的“IGES”命令可实现 IGES 文件的导入和导出。在“文件转换”子菜单选择“IGES”选项，在主功能表中弹出与“ASCII”子菜单类似的“IGES”子菜单。该子菜单的前 4 个选项与“ASCII”子菜单中对应的选项的用法相同，但多了一个“扫描文件”功能。

在导入一个 IGES 文件时，选择一个要导入的文件后，系统弹出如图 6-21 所示“IGES 的读档参数”对话框，下面仅介绍几个重要选项。

（1）修整曲面的处理方式　该选项组用来设置修整曲面的模式，共有 4 种模式，分别

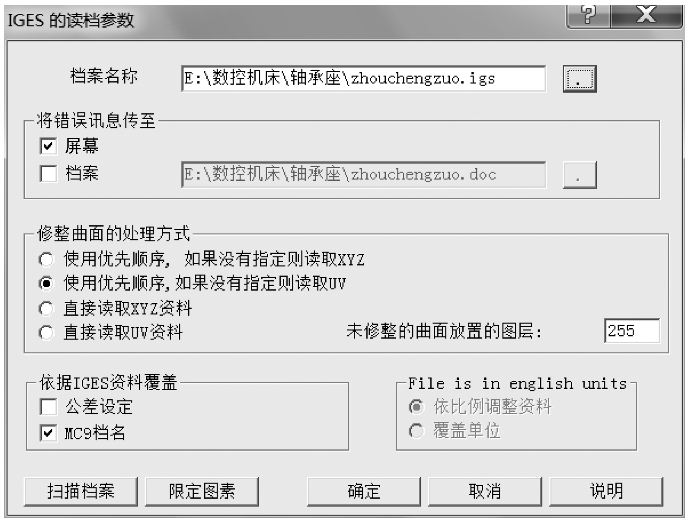


图 6-21 “IGES 的读档参数”对话框

为：优先使用 IGES 文件的标记，若没有，则使用 XYZ 坐标；优先使用 IGES 文件的标记，若没有，则使用 UV 坐标；直接读取 XYZ 坐标；直接读取 UV 坐标。

（2）依据 IGES 资料覆盖　选中“公差设定”复选框，则将 IGES 文件的公差作为 MC9 文件的公差。选中“MC9 档名”复选框，则将 IGES 文件的文件名作为 MC9 文件的文件名。

（3）“扫描档案”按钮　该按钮的功能是列出所选择的 IGES 文件的有关信息。

5. 其他文件的导入导出

使用“文件转换”子菜单中的“Parasld”“STL”“VDA”“SAT”“MC8”“NFL”和“CADL”命令可实现 Parasld、STL、VDA、SAT、MC8、NFL 和 CADL 类文件的导入和导出，且子菜单各选项的使用方法与以上选项基本相同。

6.3.2 MasterCAM 系统的 CAM 功能

当模型建立以后，最终目的是通过 MasterCAM 提供的强大 CAM 功能自动生成数控加工程序，在数控机床上加工出合格的零件。通常 CAM 部分的操作流程如图 6-22 所示。

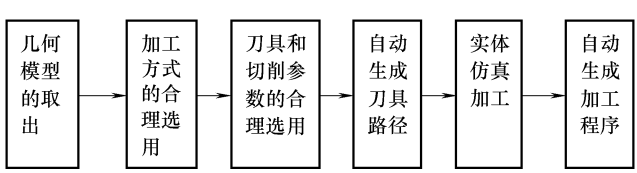


图 6-22　CAM 部分的操作流程

1）几何模型的取出。取出二维或三维零件的几何造型。

2）加工方式的合理选用。根据零件信息和精度等要求，选用合理的加工方式。包括外形铣削、挖槽、钻孔、面铣、曲面加工等多种方式。

3）刀具和切削参数的合理选用。选择合适的切削刀具和合理的切削参数对零件的加工有很大的影响。

4）自动生成刀具路径。根据所选的切削加工方法和工艺参数，MasterCAM 自动生成刀具路径，并用不同颜色的线条显示在零件几何图形上。

5）实体仿真加工。根据生成的刀具路径，仿真实际切削加工过程，以检验刀具路径是否合理，并进行过切、欠切、干涉等问题的验证。

6）自动生成加工程序。通过后置处理功能，MasterCAM 将仿真模拟加工确定的刀具路径轨迹自动生成加工程序。这种程序是各种 CNC 机床所能接受的，且能用于机床加工产品。

上述过程就是 CAM（计算机辅助制造）技术。凡是能接受控制代码，实现自动加工的机床都可以被称为数控机床，即 CNC（计算机数值控制）机床。包括：数控铣床、加工中心、数控车床、车削中心等。MasterCAM 具体的 CAM 功能将在后续的示例中详细叙述。

6.3.3　MasterCAM 系统相关性及其应用

MasterCAM 系统的相关性是指刀具路径、刀具参数、刀具材料、加工参数联系工件的几何模型构建一个完整的操作程序。若操作程序的任何部分改变，另一个相关部分可重新生成，不需要重新构建全部操作程序，即可重新生成 NCI 文件，并将所有的这些资料存储在一个 MC9 文件中。

MasterCAM 系统相关性的刀具路径功能用于外形铣削、钻孔、挖槽、面铣、曲面加工、多轴加工等。而刀具管理、操作管理、定义刀具、串连管理、刀具参数、工作设置等功能在所有相关的刀具路径中是公用的。

1. 刀具管理

在主功能菜单中单击“公用管理”→“定义刀具”→“数据库”命令，弹出如图 6-23 所示的“刀具管理员”对话框。



图 6-23　“刀具管理员”对话框

在“刀具管理员”对话框中列出了当前刀具的相关参数，包括显示的刀具数、刀具号码、刀具型式、直径、刀具名称、刀角半径及刀具的使用情况等。如果显示的刀具数量较

大，可以选中“过滤刀具”选项来设置显示哪一类刀具，同时也可以在“刀具管理员”对话框中单击鼠标右键，通过刀具管理快捷菜单完成刀具的管理。

2. 定义刀具

在生成刀具路径时，只能选用当前刀具列表中的刀具。因此，必须先根据加工需要，使用“定义刀具”对话框定义或编辑当前刀具列表中的刀具参数。在图 6-23 所示的“刀具管理员”对话框中选择刀具，单击鼠标右键弹出“刀具管理”快捷菜单，单击“建立新的刀具”按钮，选择一种刀具类型，弹出如图 6-24 所示的“定义刀具”对话框。在弹出的“定义刀具”对话框里有三个选项卡：刀具型式（图 6-24）、刀具（图 6-25）和参数（图 6-26）。

（1）刀具型式　单击“刀具型式”选项卡，出现如图 6-24 所示的“刀具型式”对话框，在该对话框中可以选择刀具的类型。



图 6-24　“定义刀具”对话框

（2）刀具　刀具类型选取后，可设置该刀具的参数，如图 6-25 所示。不同类型的刀具定义的参数略有不同，一般有以下几个选项：直径，刀刃，刀长，夹头直径，刀柄直径，刀具号码，刀塔编号，允许的操作，刀角半径，轮廓的显现。

（3）参数　无论采用何种方法生成刀具路径，在指定加工区域后，都需要定义加工用刀具的参数，这些参数中的许多项直接影响后置处理程序。每个刀具路径都要输入的参数，属于共同参数，其中大部分参数可以通过选择或新建刀具来更改，也可在“刀具参数”选项卡中直接输入更改。

1）选择或新建刀具来设置刀具参数。单击“定义刀具”对话框中的“参数”选项卡，

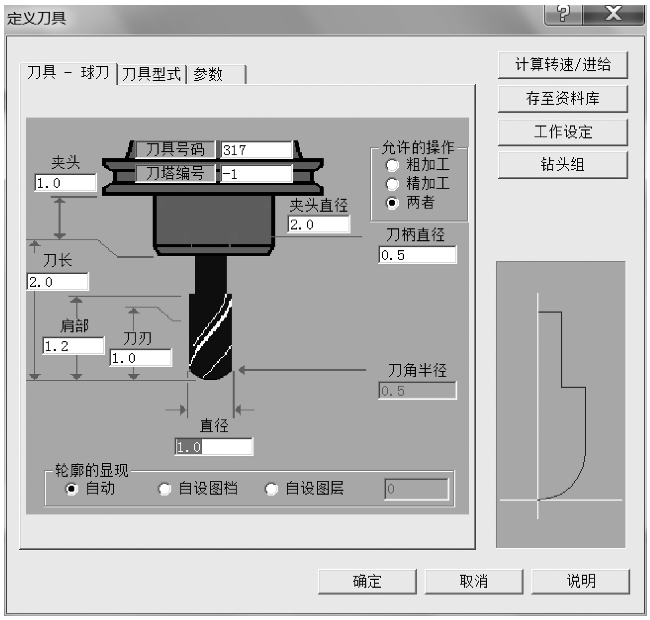


图 6-25　“刀具”选项卡

弹出如图 6-26 所示的“参数”选项卡。用来设置加工过程中切削用量等参数。

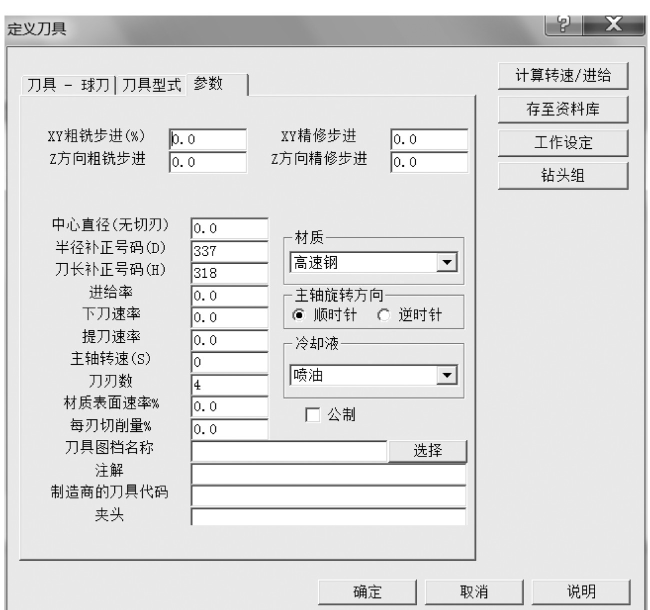


图 6-26　“参数”选项卡

2）在“刀具参数”选项卡中直接输入、更改刀具参数（图 6-27）。

在主功能表中单击“刀具路径”命令，选择一种加工方式，本节以外形铣削为例，使

用轮廓铣削功能，弹出“刀具参数”选项卡，如图 6-27 所示，其中的参数为公共刀具参数，通过该对话框可实现刀具参数设置。



图 6-27 “刀具参数”选项卡

（4）工作设定 在主功能表中单击“刀具路径”→“工作设定”命令，弹出如图 6-28 所示的“工作设定”对话框，用来设置当前的工作参数，包括工件设置、刀具路径规划、刀具补正号码设置、进给率的计算、材质以及后处理方式等的设置。

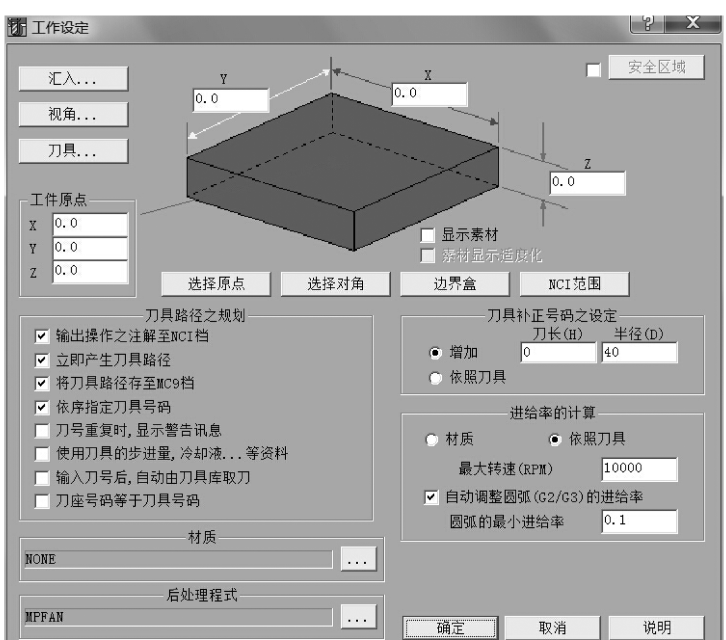


图 6-28 “工作设定”对话框

1）工件设置。工件设置包括设置毛坯的大小、工件原点、材料等。工件原点的确定就是求解毛坯上表面的中心点在绘图坐标系中的坐标。MasterCAM 设定毛坯原点的方法与确定毛坯范围有关，可以通过以下方式来确定：

① 直接在图 6-28 所示的“工件原点”文本框中输入毛坯中心点的 *X*、*Y*、*Z* 坐标值。毛坯范围则分别按 *X*、*Y* 和 *Z* 方向在图中的文本框中输入。

② 在图 6-28 中单击“选择原点”按钮，在绘图区，通过鼠标选择图形的某点，系统即把该点作为毛坯原点，系统返回“工作设定”对话框，并显示该点坐标。

③ 在图 6-28 中单击“选择对角”按钮，在绘图区选择工件的对角点，确定毛坯的范围，系统返回“工作设定”对话框并自动显示工件毛坯的原点坐标值。

④ 在图 6-28 中单击“边界盒”按钮，回到绘图区，选择所绘工件图形在 *X*、*Y*、*Z* 三个方向的边界线（上下、前后和左右），然后单击主功能表中的“执行”，系统将自动以图形边界为毛坯的范围，并计算出原点坐标。

⑤ 在图 6-28 中单击“NCI 范围”按钮，系统将自动计算出刀具路径的最大和最小坐标作为毛坯范围，并求出毛坯原点坐标。

2）刀具路径规划。该功能区用于设定产生路径的一些要求。

3）工件材质及刀具补正与进给计算。

① 材料设置。在“工作设定”对话框中单击“材质”左边的“…”按钮，出现工件材料的选择对话框，可选择材料库中的材料。

② 刀具补正号码设定。用于设定刀长补正和刀半径补正。

增加：在生成路径中加入指定的刀长和半径补正号码。

依照刀具：直接使用刀具定义中的刀长和半径补正号码。

③ 进给率的计算。用于确定计算进给速度的方式。

依照工件材质：依据工件材料来计算进给速度和主轴转速。

依照刀具：使用刀具定义的进给速度和主轴转速。

最大转速：设定的最高转速限制。应根据机床或加工安全性来设置。

自动调整圆弧（G2/G3）的进给率：选择该项，系统会自动调整圆弧处的进给率。

圆弧的最小进给率：给定圆弧加工时的最小进给率。

6.3.4　刀具路径操作管理

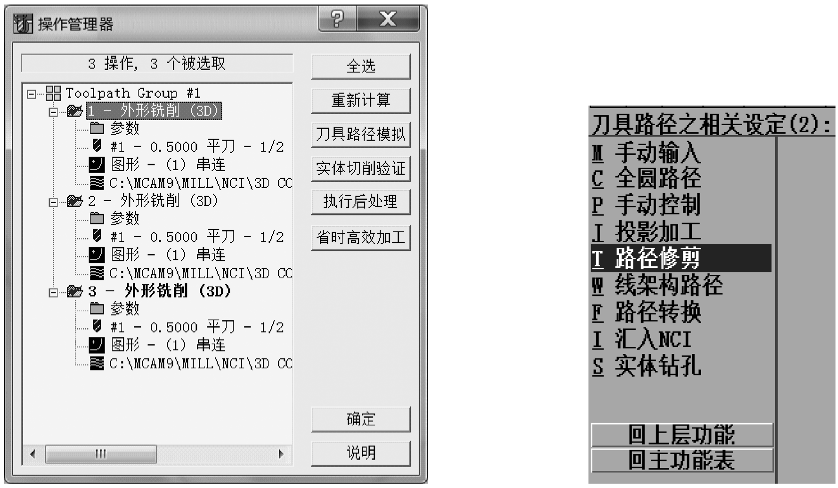
在主功能表中单击“刀具路径”→“操作管理器”命令，弹出“操作管理器”对话框，或者在设定完加工参数后，系统会弹出如图 6-29a 所示的“操作管理器”对话框。

操作管理器中列出了当前已定义的所有操作。用户可以用鼠标单击选择一种操作，此时在该操作前会出现一个蓝色的“√”，也可以单击“全选”，来选中所有的操作。选择某一或部分或全部操作后，就可以对其进行参数修改、重新计算、刀具路径模拟、实体切削验证、执行后处理以及高效加工等操作。

如果要对生成的刀具路径进行修剪或转换，就要用到修剪或转换功能。前者可以减少空走刀；后者主要是对生成的刀具路径进行平移、镜像和旋转，以生成新的刀具路径。本节将对这两部分内容进行讲解。

1. 路径修剪

路径修剪用于对已经完成的 NCI 刀具路径进行修剪，将原有刀具路径中不必要的部分



a)　　b)

图 6-29　操作管理器及路径修剪

a）操作管理器　b）路径修剪

删除。修剪时必须要有修剪边界，且修剪边界必须是封闭的，边界可以绘制成任何形状和尺寸，并可位于刀具路径以外。

路径修剪的步骤：

1）先绘制要加工曲面的修剪边界，编制好正常的加工路径，存储 NCI 文件如 TRIM. NCI，以便编制修剪刀具路径时使用。

2）开启修剪功能，在主功能表中单击“刀具路径”→“下一页”→“路径修剪”命令，或在“操作管理器”中单击鼠标右键，选择“刀具路径”→“路径转换”，如图 6-29b 所示。若没有定义刀具路径，则会出现“0 个操作被定义”的警告提示。

3）按系统提示选择“串连修剪边界”，然后单击“执行”按钮，并在要保留的地方输入一点。

4）系统将打开“路径修整”对话框，如图 6-30 所示。在刀具路径列表中选择要修剪的操作并设定必要的参数，单击“确定”按钮。

5）系统开始修剪路径，最后修剪操作被加入操作管理器中，选择该操作进行路径模拟就可以检验修剪后的路径，如图 6-31 所示为修剪前和修剪后的刀具路径。

2. 路径转换功能

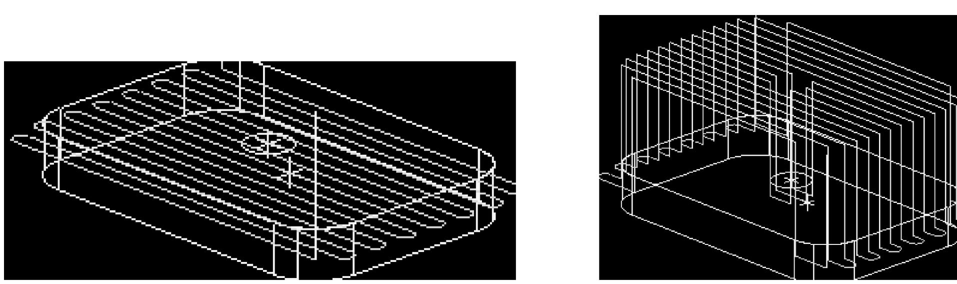
路径转换功能是重复以前的刀具路径，通过平移、镜像和旋转来产生新的操作，进行多次加工。在主功能表中单击“刀具路径”→“下一页”→“路径转换”命令，或在“操作管理器”中单击鼠标右键，选择“刀具路径”→“路径转换”，弹出如图 6-32 所示的“路径转换”对话框，该对话框共有 4 个选项卡。

（1）形式及方法　主要设定路径转换的方式（图 6-32）。

（2）平移　路径平移转换可以产生一系列的刀具路径，各刀具路径的走刀方式和走刀方向都与原刀具路径相同。“平移”选项卡如图 6-33 所示。



图 6-30　“路径修整”对话框



a)　　　　b)

图 6-31　路径修剪

a）修剪前的刀具路径　b）修剪后的刀具路径

需要用户指定平移的方式，并设定相应的参数，有 4 种方式：

1）直角坐标。直接输入操作对象在 *X*、*Y* 方向的平移间距以及平移次数，平移的结果就相当于 *XY* 平面内对原始路径进行阵列。

2）两点间。刀具路径可以在空间任意两点间平移，用户可以单击“起点”按钮，选择平移的起点，再单击“终点”按钮选择平移终点，也可以直接输入平移起点和终点的坐标。

3）极坐标。用于输入平移点位置的极坐标，包括距离和角度。

4）两视角间。平移可以在两视角间进行，输入视角平面代号即可。

（3）旋转　对于一些较复杂的环形对称零件的加工，用户可以事先处理零件的一部分

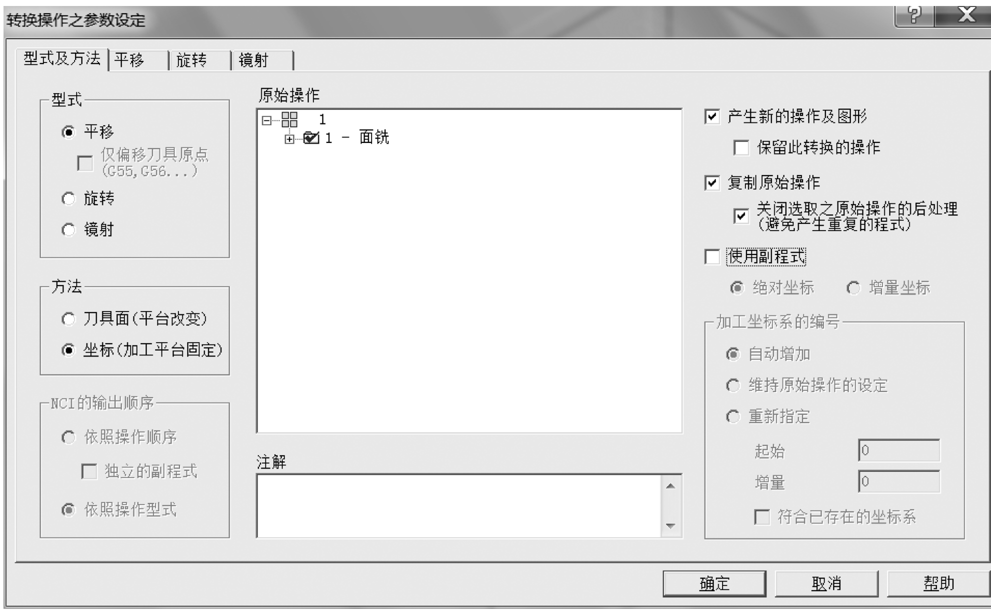


图 6-32　刀具转换操作参数设置



图 6-33　“平移”选项卡

加工表面的刀具路径，然后通过旋转达到加工整个工件的目的。

（4）镜射　镜射转换可以产生一组对称某一轴线的刀具路径。

如果原加工内容发生变化，转换后的路径也会发生相应的变化，即新产生的操作是与原路径相关联的。

6.4　2.5 轴加工

2.5 轴加工在加工过程中产生水平方向的两轴联动，而 Z 轴方向只在完成—层加工后进入下一层时才做单独的动作。MasterCAM 的 2.5 轴加工类型有外形铣削、挖槽加工、钻孔加工以及面铣等多种。

6.4.1　外形铣削

外形铣削的特点是沿着轮廓线生成切削加工的刀具轨迹。轮廓可以是二维的，也可以是三维的，二维轮廓产生的刀具路径的切削深度是固定不变的，而三维轮廓产生的刀具路径的切削深度是变化的。二维轮廓的铣削是一种 2.5 轴的铣床加工。轮廓铣削主要用于一些外形简单零件的外轮廓成形。

1. 外形铣削的专用参数

在主功能表中单击“刀具路径”→“外形铣削”命令，启动外形铣削功能并进行参数设置。其设置的参数分为共同参数和专用参数两种。共同参数即刀具参数，前面已经讲过，这里不再赘述。“外形铣削参数”选项卡如图 6-34 所示。

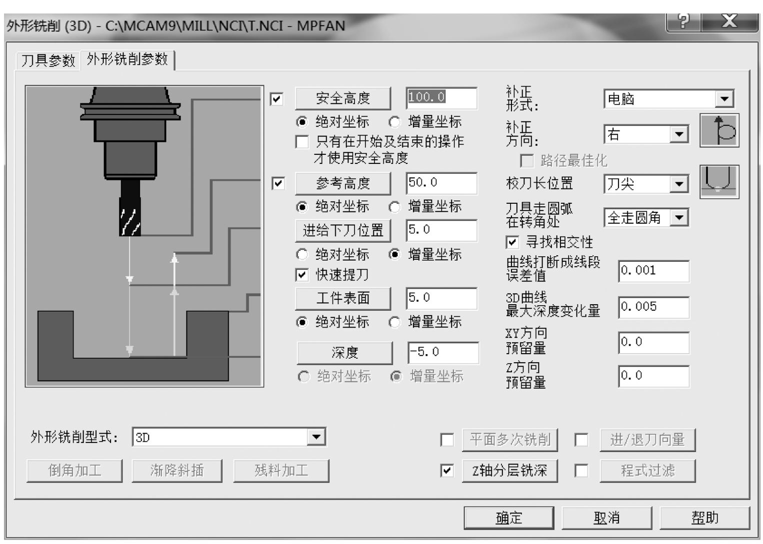


图 6-34　“外形铣削参数”选项卡

2. 外形铣削的注意事项

1）组成轮廓线的曲线须按次序选择，且选择的前后曲线必须相交。

2）选取轮廓时，一定要注意曲线连接的方向，以保证铣削侧边正确。

3）终止高度—定要比起始高度深，否则无法运算；起始高度加上进给下刀位置不能大于安全高度。

4）对于毛坯加工，进刀时宜以直线垂直进刀，并且将进刀线长度设置得足够大，以保证进刀点在被加工件毛坯以外。

5）脱模角是以轮廓所在位置进行计算，当轮廓所处的位置与所需位置不同时，要重新生成一条在参考高度的轮廓线。

6）铣削封闭轮廓时，起始点最好不要设置在转角附近的位置。

7）当加工余量较大时，可以设定多次加工和切削步距进行多刀加工。

8）尽可能使用圆弧进/退刀方式，以获得较为理想的表面加工质量。

6.4.2 挖槽加工

挖槽加工的特点是移除封闭区域里的材料，其定义方式由外轮廓与凸台组成。挖槽加工与轮廓加工最大的区别是：挖槽加工是大量地去除一个封闭轮廓内的材料，另外通过轮廓与轮廓之间的嵌套关系，去除要加工的部分；而轮廓加工虽然也可以选择多个轮廓，但它们不存在嵌套关系，虽然也可以大量地去除轮廓外或轮廓内的材料（通过设定较多的毛坯余量和侧向步距），但不适用于毛坯余量不均匀的轮廓。

一般来说，挖槽加工的轮廓应该是封闭的，当选择了开放的轮廓后，就只能使用开放轮廓的挖槽加工来进行刀具路径的生成。

挖槽加工专用参数的设置。在主功能表中单击“刀具路径”→“挖槽”命令。选取挖槽加工的轮廓边界，可以选择多条轮廓线作为加工轮廓；单击“挖槽”子菜单中的“执行”按钮完成轮廓线的选择，进入加工参数设置，如图 6-35 所示。

挖槽加工参数共有 3 项：刀具参数、挖槽参数、粗铣/精修参数。“刀具参数”选项卡与外形铣削的“刀具参数”选项卡完全一致。

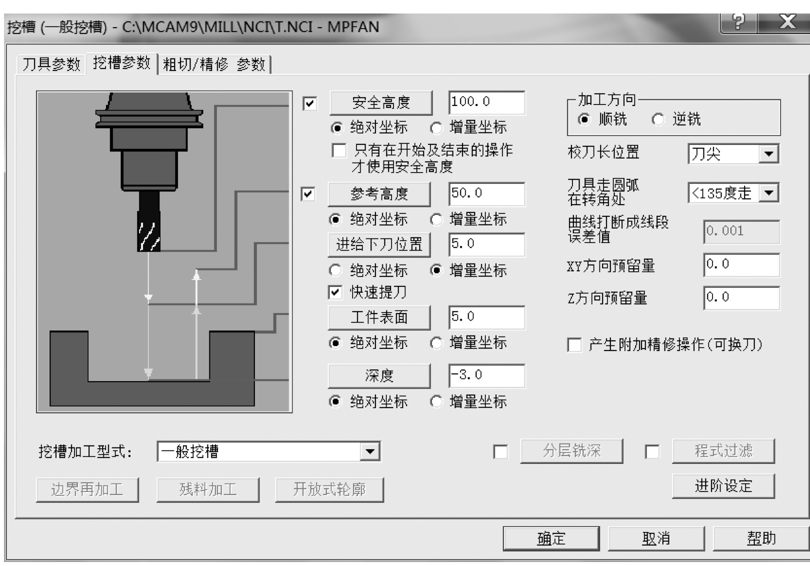


图 6-35 “挖槽参数”选项卡

1. 挖槽参数

如图 6-35 所示为“挖槽参数”选项卡。其“刀具参数”选项卡与轮廓铣削的刀具参数基本相同，下面只介绍不同参数的含义。

（1）加工方向　用于设定挖槽加工时在切削区域内的刀具进给方向，分为逆铣和顺

铣两种方式。为了延长刀具的寿命并获得较好的表面加工质量，一般数控加工多选用顺铣。

（2）产生附加的精修操作（可换刀）　指制订刀具路径时，同时生成一个精加工的操作。

（3）分层铣深　选中图 6-35 中“分层铣深…”前的复选框，激活 *Z* 轴分层铣深。单击“分层铣深…”按钮，弹出“分层铣深设定”对话框。该对话框在外形铣削中的“分层铣深”对话框的基础上，多了一个“使用岛屿深度”选项，在整个分层的铣削加工过程中，该选项将补充一层在岛屿深度的顶面。

（4）进阶设定　单击图 6-35 右下角的“进阶设定…”按钮，弹出如图 6-36 所示的“进阶设定”对话框。用来设置残料加工和等距挖槽时的误差值，可以按刀具直径的百分比或直接输入公差数值来设定。

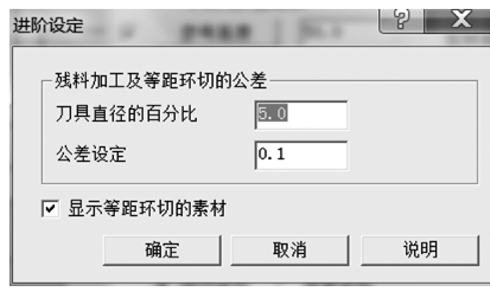


图 6-36　“进阶设定”对话框

（5）挖槽加工形式　挖槽加工形式有 5 种，一般挖槽、边界再加工、使用岛屿深度挖槽、残料清角、开放式轮廓挖槽，一般挖槽是主要加工形式，其他 4 种用于辅助挖槽加工。下面简要说明这 4 种形式。

1）边界再加工。一般挖槽加工后，可能在边界处留下毛刺，这时可采用该功能对边界进行加工。

2）使用岛屿深度挖槽。采用一般挖槽加工时，系统不会考虑岛屿深度变化，当岛屿的深度和槽的深度不一样时，就需要采用该功能。使用岛屿深度挖槽可以打开“边界再加工”对话框，对话框与边界再加工方式的对话框相同，但是其将岛屿上方的预留量选项激活，同时它的边界是指岛屿轮廓线。

3）残料清角。主要是用较小的刀具去切除上一次（较大刀具）加工留下的残料部分，挖槽加工的残料清角与外形铣削残料清角基本相同。但是挖槽加工生成的刀具路径是在切削区域范围内多刀加工的。

4）开放式轮廓挖槽。系统专门提供了开放挖槽加工的功能，用于轮廓未完全封闭，一部分开放的槽形零件加工。在“开放式轮廓挖槽加工”对话框设置刀具超出边界的百分比或刀具超出边界的距离，即可进行开放式挖槽加工。生成的刀具路径将在切削到超出距离后，以直线连接起点与终点。

2. 粗切/精修参数

粗切/精修参数决定了切削加工的走刀方式、切削步距、进/退刀等重要参数。挖槽加工的“粗切/精修参数”选项卡如图 6-37 所示，其参数说明如下：

（1）粗切参数　图 6-37 所示选项卡的上半部分为粗切加工参数设置，包括粗切加工的切削方式设置、切削间距设置、进刀设置、切削方向设置等。

1）切削方式。MasterCAM 提供了 8 种挖槽粗铣切削方式，在挖槽加工过程中设定适当的切削方式，对于刀具路径的产生是非常重要的条件。环绕切削也称环切法加工，环绕式的加工方式是以绕着轮廓的方式清除素材，并逐渐加大轮廓，直到无法放大为止，如此可减少

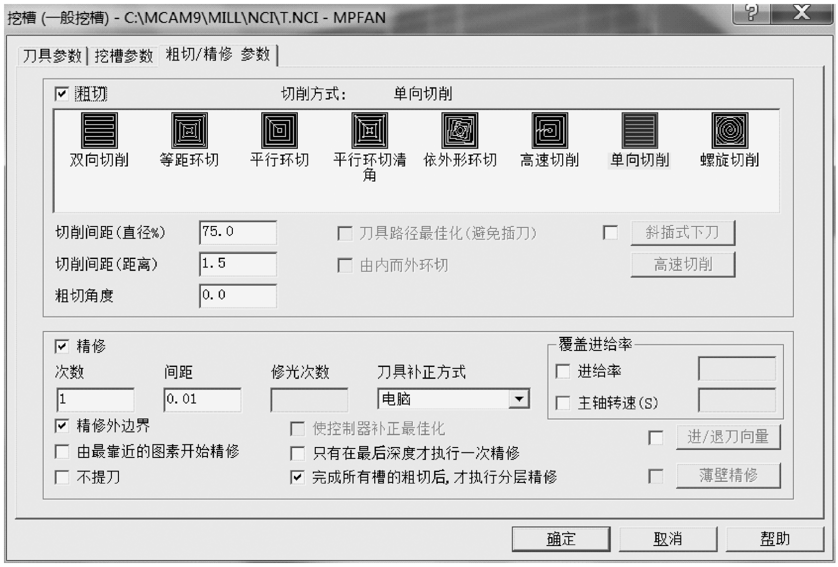


图 6-37 “粗切/精修参数”选项卡

提刀，提高铣削效率。MasterCAM 提供了 6 种环绕切削的方法。

① 双向切削。产生一组来回的直线刀具路径。其所建构刀具路径将以相互平行且连续不提刀的方式产生。

② 单向切削。所建构的刀具路径相互平行，且在每段刀具路径的终点，提刀至安全高度后，以快速移动速度行进至下一段刀具路径的起点，再进行铣削下一段刀具路径的动作。

③ 等距环切。构建的粗加工刀具路径，以等距切除毛坯，并根据新的毛坯量重新计算，重复该处理过程直至系统完成铣削加工。

④ 平行环切。以平行螺旋方式粗加工内腔，每次用横跨步距补正轮廓边界。该选项加工时可能不能完全清除毛坯。

⑤ 平行环切清角。以平行环切的方法粗加工内腔，但在内腔角上增加小的清除加工，切除更多的毛坯。

⑥ 依外形环切。依外形螺旋方式产生挖槽刀具路径。

⑦ 螺旋切削。以圆形、螺旋方式产生挖槽刀具路径。

⑧ 高速切削。以平行环切的同一方法粗加工内腔，但其在行间过渡时采用一种平滑过渡的方法，另外在转角处也以圆角过渡，保证刀具整个路径平稳而高速。

2）由内而外环切。选择了环绕切削的某一切削方式后，“由内而外环切”复选框变得可选，该选项用于确定每一种环绕切削方式的挖槽起点。选中该项，系统将从挖槽中心或指定挖槽起点开始，向外环绕至挖槽边界；该选项不被激活时，系统自动由挖槽边界外围开始环绕切削至挖槽中心。

（2）下刀方式　用于设定粗加工 Z 方向的下刀方式。MasterCAM 提供了螺旋下刀和斜插式下刀两种方式。激活该选项，设置下刀方式。

（3）精修　在挖槽加工中可以进行一次或数次的精修加工，让最后切削轮廓成形时最

后一刀的切削加工余量相对较小且均匀，从而达到较高的加工精度和表面加工质量。这种挖槽的精修加工有点类似于轮廓加工。

6.4.3　钻孔加工及钻孔加工专用参数

MasterCAM 的钻孔加工可以指定多种参数进行加工，设定钻孔参数后，自动输出相对应的钻孔固定循环加工指令，包括钻孔、铰孔、冲孔、攻螺纹等加工方式。

在主功能表中单击“刀具路径”→“钻孔”命令，打开钻孔主菜单，如图 6-38a 所示。同时弹出属于要加工的孔的点的选择，如图 6-38b 所示。

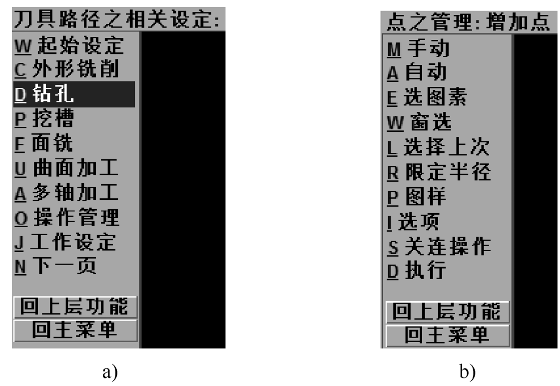


图 6-38　钻孔参数设置

a）钻孔菜单　b）点的管理

钻孔加工的程序参数设定：

1. 刀具参数设定

钻孔加工的刀具参数设置相对于其他加工方式要少，在钻孔加工中，由于没有横向的切削移动，所以没有刀具直径补偿选项。另外，插入进给、抬刀进给将不能使用。各个选项的参数含义及设置方法与铣床加工没有区别。

2. 钻头的建立

在选择建立新刀具时，选择刀具类型为钻头，返回刀具形状参数表，在钻头的公用形状参数中，最重要的参数是钻头直径和刀尖角度，如图 6-39 所示。

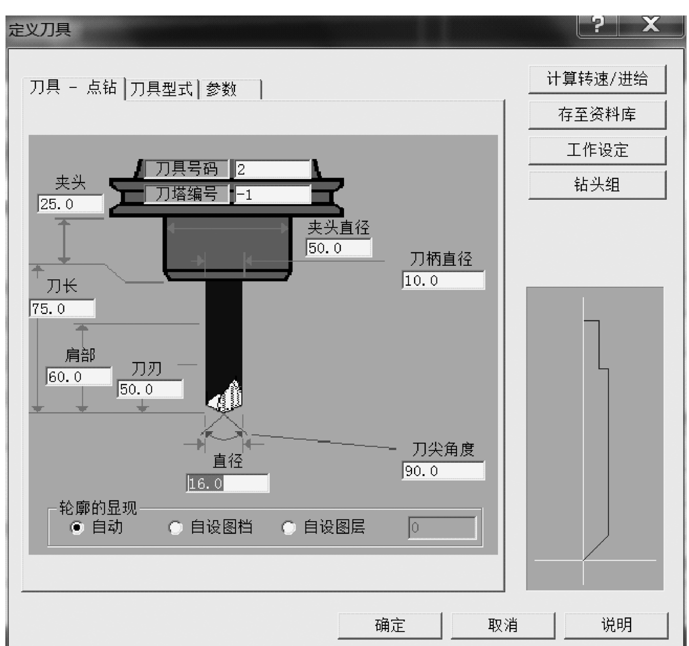


图 6-39　钻头参数

3. 钻孔参数

（1）有关高度或深度参数的设置　如图6-40所示的专用钻孔参数对话框中，关于钻孔参数中的安全高度、参考高度、工件表面与外形铣削的安全高度、参考高度、工件表面的设置方式和功能完全一致，此处不再赘述。

钻孔深度设置孔底部的深度位置，可以使用绝对值或者相对值。

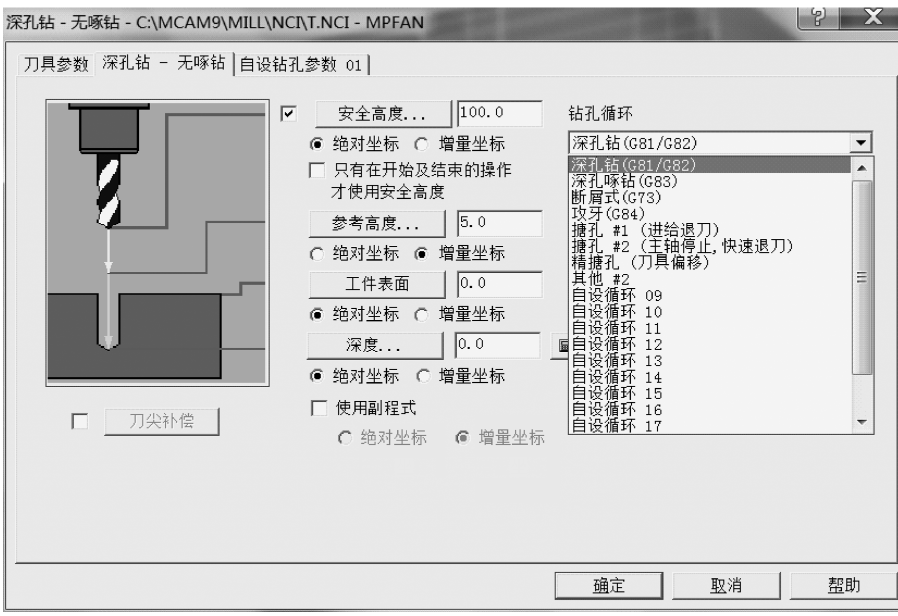


图6-40　钻孔参数设置

（2）刀尖补正设置　当选择“刀尖补偿”选项时，钻头的端部斜角部分将不计算在深度尺寸内，单击“刀尖补偿”按钮，以设置贯穿距离，从而确保钻孔时刀具的直径全部钻穿工件。

（3）钻孔循环参数设置　钻孔固定循环方式可以选择包括钻孔、铰孔、镗孔、攻螺纹等方式在内的各种标准固定循环指令。

6.4.4　轴加工实例

本实例要加工的零件模型如图6-41所示。该零件外形呈正方形，边长为100mm，高为25mm，四周为半径20mm的圆弧倒角。椭圆形凹槽深度为6mm，4个孔的直径为16mm。

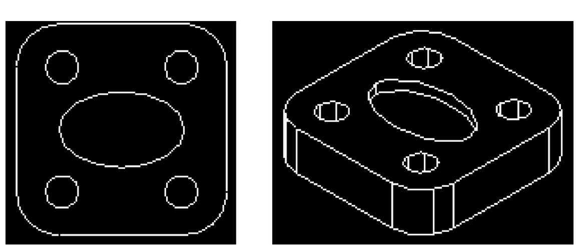


图6-41　零件模型

1. 零件的加工要求

铣削零件上表面外形轮廓（上、下表面已完成加工）。挖深度为 6mm 的槽。钻直径为 16mm 的孔。

2. 加工工艺分析

（1）零件结构分析　因为零件有外形、凹槽和孔，所以需要进行零件的外形轮廓铣削、挖槽和钻孔。

（2）加工顺序的确定　根据数控铣床的工序划分原则，先平面铣削，后孔和槽加工，所以零件的加工顺序如下：粗铣和精铣外轮廓；挖深度为 6mm 的槽；钻直径为 16mm 的孔。

（3）装夹与定位的选择　由于该零件为轴对称零件，所以便于装夹和定位，可以采用找正定位方式。

（4）加工刀具的选择　选择直径 10mm，材料为硬质合金的圆鼻铣刀，铣削外形轮廓；直径 16mm，材料为高速钢的麻花钻来加工直径为 16mm 的孔；直径 10mm，材料为高速钢的平铣刀来挖深度为 6mm 的槽。

3. 初始化加工环境

1）启动 MasterCAM，打开零件模型文件，在主功能表中单击“Machine Type”→“Mill”→“Default”命令，选择默认铣床。

2）在主功能表中的“刀具路径”属性下单击“工作设定”，设置好毛坯的长、宽、高（可设为 110、110、25），以及工件原点。

4. 规划刀具路径

（1）外形铣加工　在主功能表中单击“刀具路径”→“外形铣削”命令，选取带圆角的正方形，单击“确认”按钮，弹出如图 6-42 所示的“外形铣削（2D）”对话框，在空白处单击鼠标右键，新建刀具，本次选择直径为 10mm 的圆鼻铣刀。确定后返回到图 6-42 中。

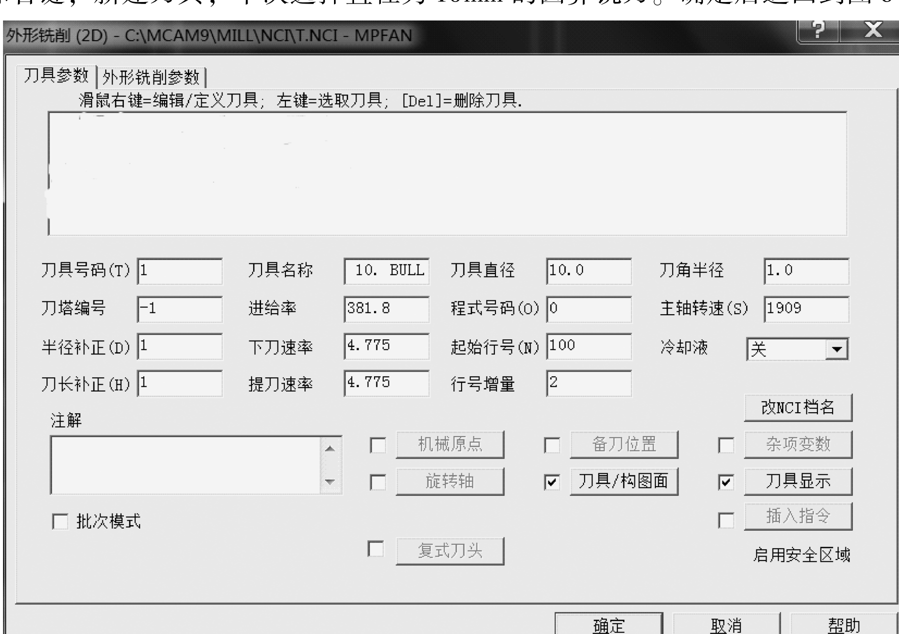


图 6-42　“外形铣削（2D）”对话框

设置主轴转速、进给速度、下刀速率和提刀速率等参数。

在如图 6-43 所示的“外形铣削参数”选项卡中，设置好安全高度、参考高度、深度等参数，同时设置好补正方式和补正方向。考虑到外形铣削要经过粗、精加工，单击“Z 轴分层铣深”按钮，打开“Z 轴分层铣深设定”对话框，如图 6-44 所示。安排 3 次粗铣，每次进刀量设置为 10mm，两次 0. 5mm 的精加工。

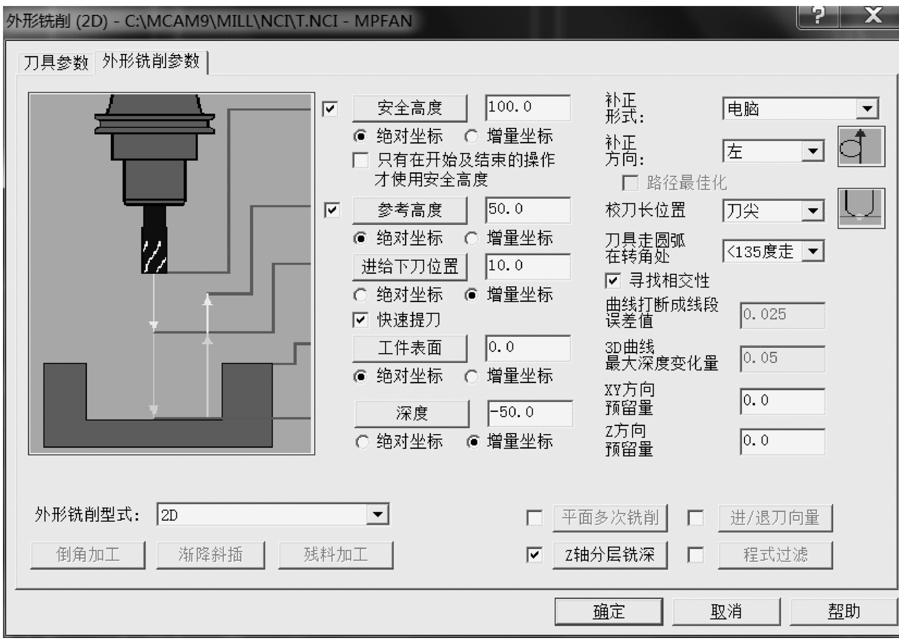


图 6-43 “外形铣削参数”选项卡

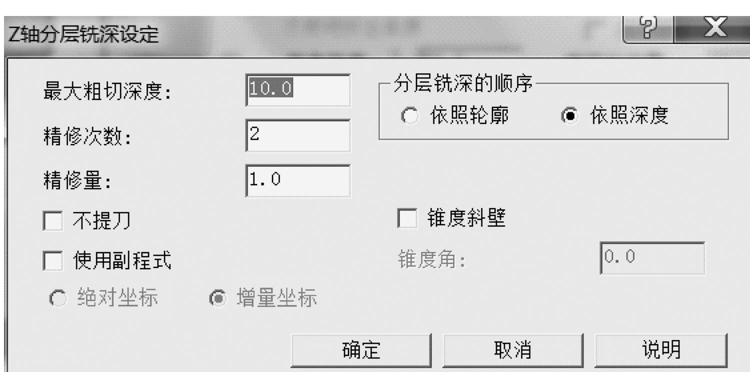


图 6-44 “Z 轴分层铣深设定”对话框

（2）挖槽加工　在主功能表中单击“刀具路径”→“挖槽”命令，选取椭圆。单击“确认”按钮，弹出“挖槽铣削参数”对话框。用与外形铣削同样的方法，通过“刀具管理”命令，选择直径为 10mm 的平铣刀。单击“确认”按钮返回“挖槽参数”中，设置其他参数。

同样，在“挖槽铣削参数”选项卡中，设置好安全高度、下刀位置、加工深度等参数，设置好刀补方式和刀补方向，同时可设置粗/精加工的有关参数和进给方式。根据此处的零件模型，采用等距环切方式。

（3）钻孔加工　在主功能菜单中单击“刀具路径”→“钻孔”命令，选取孔的中心点，单击“确认”按钮，弹出如图 6-45 所示的“深孔钻”对话框。设置相应的参数，同时可以通过勾选“刀尖补偿”设置钻头尖部的补偿，如图 6-46 所示。

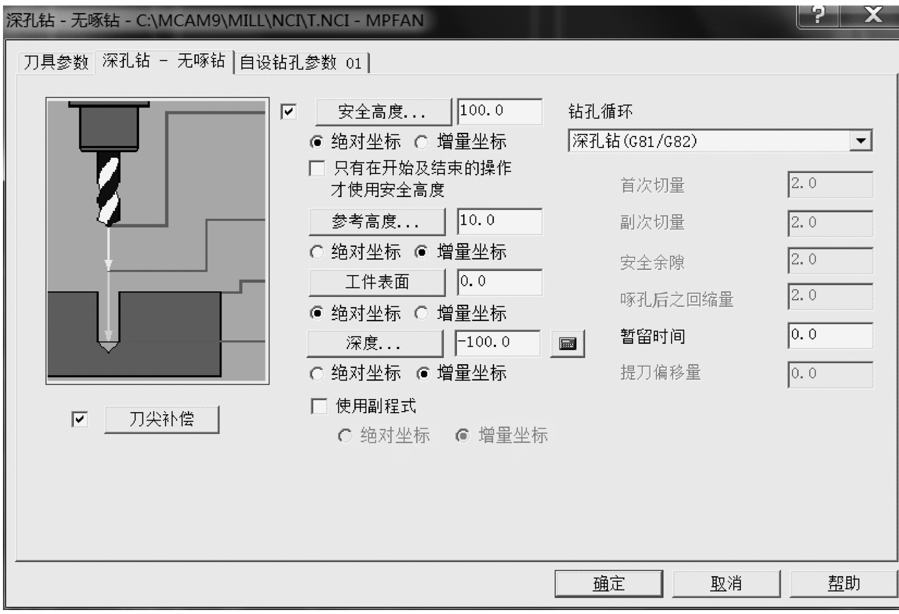


图 6-45　“深孔钻”对话框

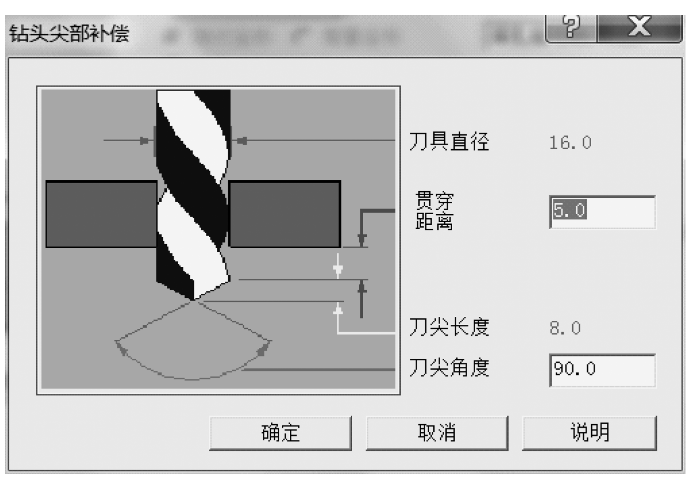


图 6-46　“钻头尖部补偿”对话框

（4）生成刀具路径　设置好以上参数后，单击“确定”按钮，生成刀具路径。

（5）实体加工模拟　生成加工路径后，单击操作管理器中的“全选”按钮，如图 6-47 所示，再单击“实体切削验证”按钮，进行模拟加工，以检验刀具路径是否正确，如图 6-48 所示。

（6）数控代码生成　对刀路验证完成后，可进行数控代码的生成，单击“操作管理器”对话框中的“执行后处理”按钮，生成相应的数控加工程序。

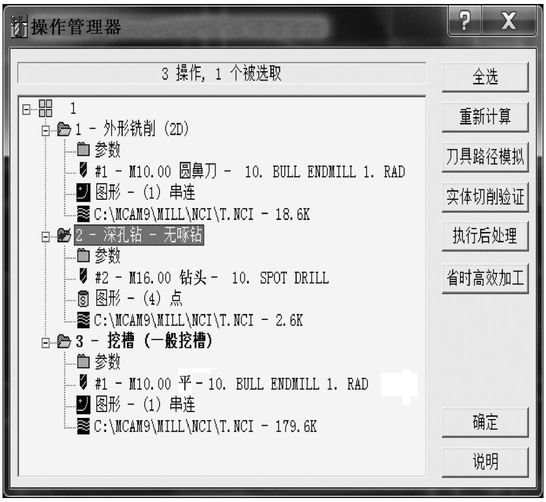


图 6-47 “操作管理器”对话框

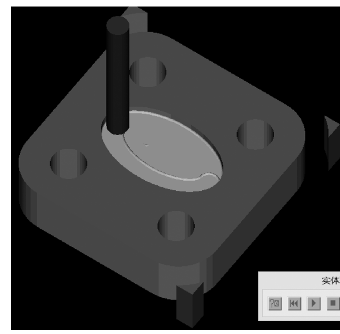


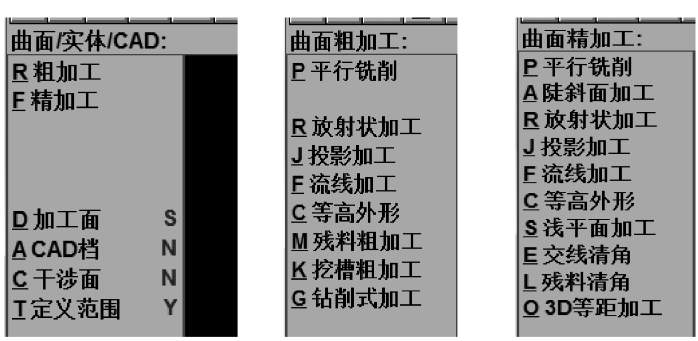
图 6-48 实体加工模拟

6.5 曲面加工

运用 MasterCAM 软件的曲面加工系统可生成加工曲面或实体表面的刀具路径。实际加工中，多数零件需要通过粗加工和精加工两步完成，MasterCAM 提供了 8 种粗加工和 10 种精加工方法。

6.5.1 曲面加工的公用参数设置

在主功能表中单击“刀具路径”→“曲面加工”命令，打开图 6-49a 所示曲面加工菜单。



a) b) c)

图 6-49 曲面加工及相关功能

a）曲面加工 b）曲面粗加工 c）曲面精加工

1）粗加工。打开曲面粗加工菜单，如图 6-49b，选择需要的粗加工方法。

2）精加工。打开曲面精加工菜单，如图 6-49c，选择需要的精加工方法。

3）加工面。设置为 S 时需手动选取加工曲面和实体，设置为 A 时自动选取所有曲面和实体作为加工曲面和实体，设置为 N 时不需选取加工曲面和实体。

4）CAD 档。设置为 N 时需指定加工曲面的 CAD 文件，设置为 Y 时不需指定。

5）干涉面。设置为 S 时需选取干涉曲面和实体，设置为 A 时自动选取所有曲面和实体作为干涉曲面和实体，设置为 N 时不需选取干涉曲面和实体。

6）定义范围。是否设置刀具切削边界。

6.5.2　曲面粗加工

在主功能表中单击“刀具路径”→“曲面加工”命令，打开曲面加工菜单，选择“粗加工”选项，打开如图 6-49b 所示的曲面粗加工菜单。MasterCAM 9.1 为用户提供了非常方便的曲面粗加工方法，包括“平行铣削加工”“放射状加工”“投影加工”“流线加工”“等高外形加工”“残料粗加工”“挖槽粗加工”和“钻削式加工”。

6.5.3　曲面精加工

曲面精加工的目的是为了精确地将三维模型的曲面形状表现出来，尽可能地达到加工的最终要求，其走刀形式是在三维曲面的表面作单层单次走刀。

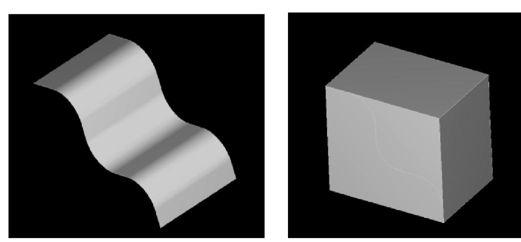
曲面精加工是加工工艺中的最后一道工序，重点是为了保证被加工工件的加工精度，尽可能地达到加工的最终要求。为了保证加工表面的精度，精加工一般采用高速、小进给量和小切削深度。

在主功能表中单击“刀具路径”→“曲面加工”命令，打开曲面加工菜单，选择“精加工”选项，打开如图 6-49c 所示的曲面精加工菜单。

精加工方式包括“平行铣削”“陡斜面加工”“放射状加工”“投影加工”“流线加工”“等高外形”“浅平面加工”“交线清角”“残料清角”和“3D 等距加工”。

6.5.4　曲面加工实例

平行铣削加工可用来加工陡斜面或圆弧过渡曲面的零件，是一种分层切削加工的方法，加工后零件（工件）的表面刀路呈平行条纹状。此加工方法刀路计算时间长，提刀次数多，加工效率不高，故实际加工中不常采用。下面以图 6-50a 所示的模型为例讲解粗加工平行铣削的一般过程。



a)　　b)

图 6-50　曲面加工模型
a）加工模型　b）毛坯

1）打开文件零件模型，系统进入加工环境。

2）在主功能菜单中单击“刀具路径”→“工作设定”命令，设置工件的外形尺寸。在“工作设定”对话框中，设置毛坯尺寸、工件原点等参数，完成工件的设置如图 6-50b 所示。

3）选择加工类型及设置加工参数。选择加工方法，在主功能表中依次单击“刀具路径”→“曲面加工”→“粗加工”→“平行铣削”，在工件形状栏中单击“未指定”，此时单击选择加工曲面，曲面高亮显示为白色则表示点选曲面成功，单击主功能表中“执行”，弹出对话框如图 6-51 所示。在对话框空白处单击右键选择“建立新的刀具”→“圆鼻刀”。

4）系统弹出“刀具参数”选项卡（图 6-51），在“刀具直径”文本框中填入“25.0”，“刀角半径”文本框中填入“5.0”，建立一把直径 25mm、圆角 $R5$mm 的圆鼻刀。

5）在“曲面粗加工-平行铣削”对话框中单击“曲面加工参数”选项卡，设置如图 6-52 所示的参数。部分选项的说明如下：

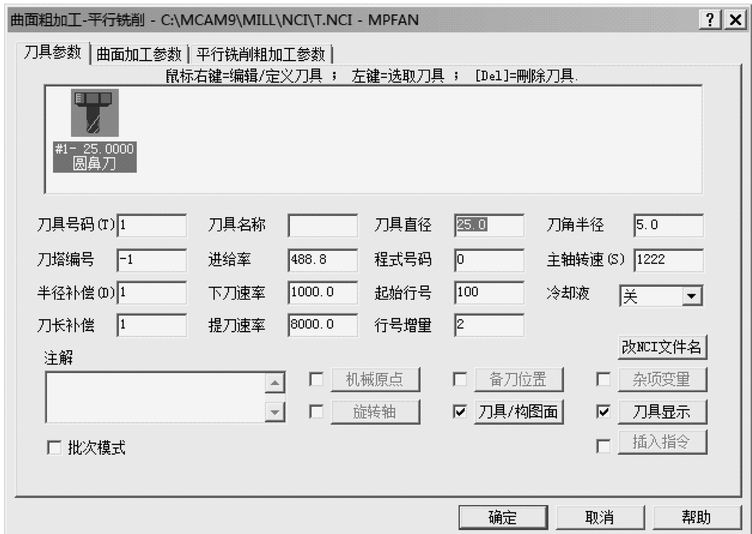


图 6-51　刀具参数设置

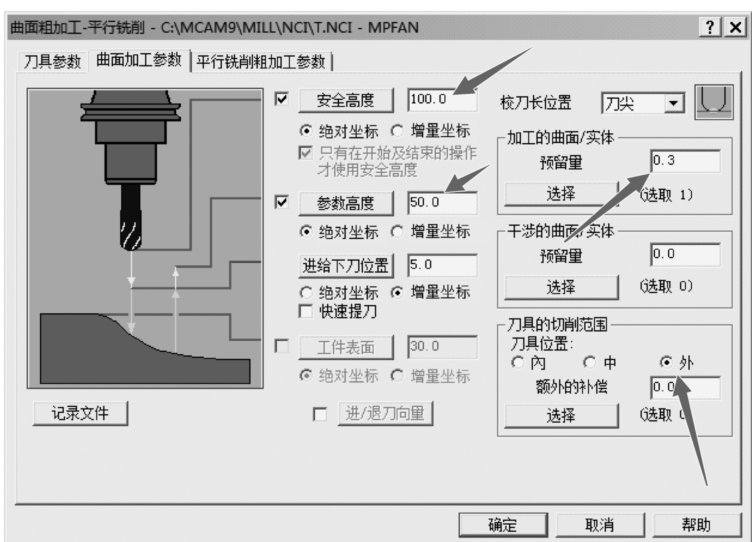


图 6-52　“曲面加工参数”选项卡

① 进/退刀向量。在加工过程中如需设置进/退刀向量时选中该复选框。单击此按钮系统弹出对话框，在对话框中可以对进刀和退刀向量进行详细设置。

② 加工的曲面/实体。此栏用于设置加工面的预留量。

③ 干涉的曲面/实体。此用于设置干涉面的预留量。

④ 刀具的切削范围。主要是在加工过程中控制刀具与边界的位置关系。单选项“内”表示设置刀具中心在加工曲面的边界内进行加工。单选项“中”表示设置刀具中心在加工曲面的边界上进行加工。单选项“外”表示设置刀具中心在加工曲面的边界外进行加工。“额外的补偿”文本框用于设置对刀具的补偿值。只有在刀具的切削范围选“中”或“外”单选项时，该文本框才被激活。

6）在“曲面粗加工-平行铣削”对话框中设置“平行铣削粗加工参数”，如图 6-53 所示。

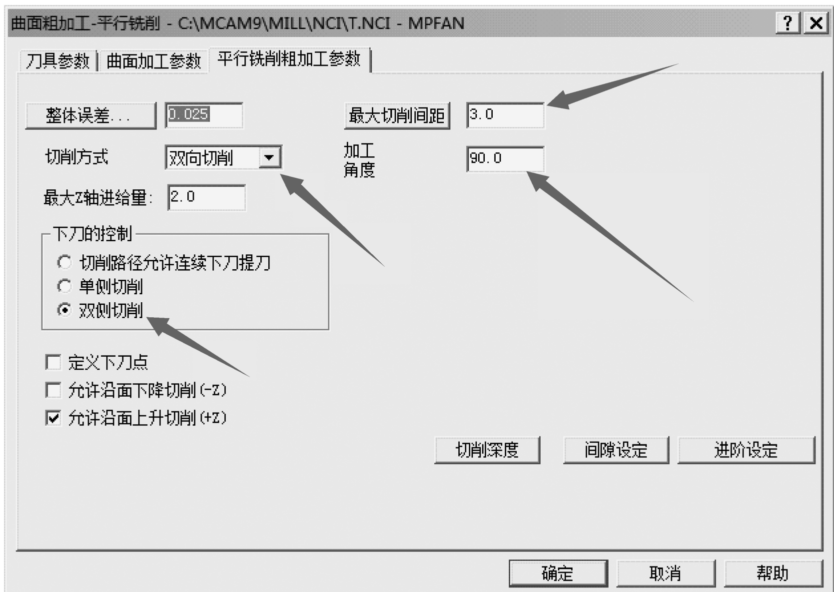


图 6-53　平行铣削粗加工参数设置

设置切削间距。在文本框中输入“3.0”。设置切削方式，在“粗加工平行铣削参数”选项卡的“切削方式”下拉列表框中选择“双向切削”，完成参数设置。其他参数设置保持系统默认设置，单击“曲面粗加工-平行铣削”对话框中的“确定”按钮，同时在图形区生成如图 6-54 所示的刀具路径。

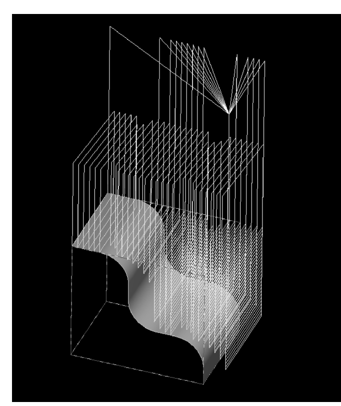


图 6-54　刀具路径

7）刀路模拟。在“操作管理器”中单击“实体切削验证”按钮，系统弹出如图 6-55 所示的“实体验证”对话框。

在“实体验证”对话框中单击“播放”按钮，系统将开始进行实体切削仿真，结果如图 6-56 所示。



图 6-55　“实体验证”对话框

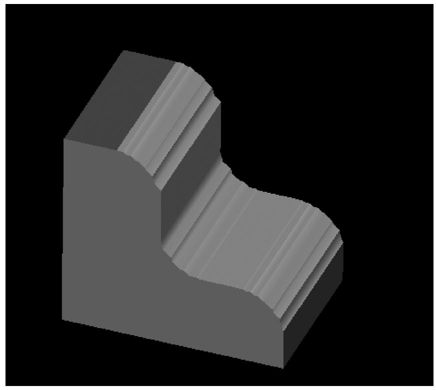


图 6-56　仿真结果

6.6　MasterCAM 综合应用实例

6.6.1　MasterCAM 数控编程的一般工作流程

利用 MasterCAM 进行数控编程的一般工作流程为：

1）按图样或设计要求，建立 MasterCAM 的 3D 模型，生成图形文件。

2）利用 CAM 模块生成轮廓加工刀具路径文件。

3）通过后置处理，将刀具路径文件生成为数控设备可直接执行的数控加工程序。

6.6.2　MasterCAM 数控编程实例

本节以实际加工中经常遇到的型腔铣削为例来讲述 MasterCAM 在产品试制中的实际应用。

1. 某试制零件的 CAD 三维建模

如图 6-57 所示为某零件在 CAD 系统中建模得到的零件三维型腔模型。该零件毛坯为一长方形坯料，零件型腔两边有锥度，底面为自由曲面。

2. 分析试制零件特征

该零件型腔大部分比较平坦，但左端（像一个瓶颈）部分较狭窄，首先进行粗加工，显然如果选用大直径刀具，瓶颈部分加工不到；但如果刀具直径小，加工效率又很低。综合考虑后，确定先用大刀加工主要的型腔部分，再用小刀专门加工瓶颈部分（图 6-58）。

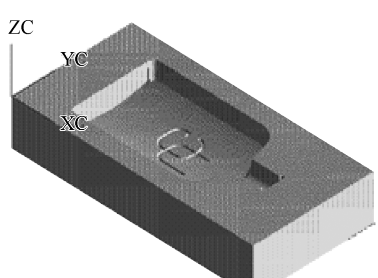


图 6-57　某零件的三维型腔模型

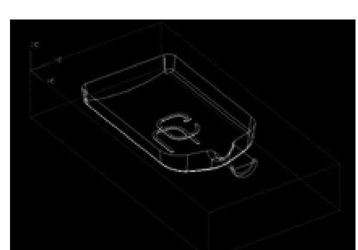


图 6-58　零件的三维型腔

3. 对待加工表面及其约束面进行三维几何建模

在 MasterCAM 系统中，根据几何元素的定义方式，在零件分析的基础上，直接对加工表面及其约束面进行造形描述，提取一些有用的边界信息。本零件所需的几何信息就是中间的型腔部分，因此应将中间部分全部选取。进入 CAM 模块，得到的模型如图 6-57 所示。(中间为型腔部分，四周为毛坯)

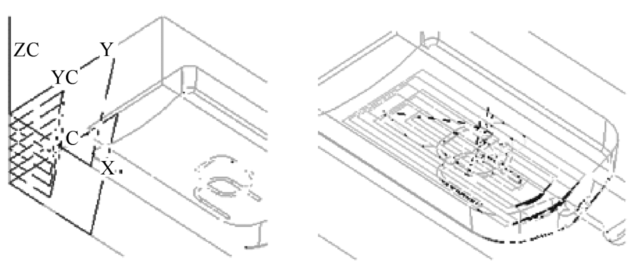
4. 选择合理的刀具

MasterCAM 软件一般提供了一些刀库供用户选择，如果没有相应的刀具，可以手工生成刀具。可通过 MasterCAM 系统提供的刀具生成对话框，填写相应的刀具参数，生成 $D=20$mm，$R1=2$mm 的平铣刀。有时还需要用户选择刀具材料，以便 MasterCAM 软件能根据它选取刀具的各种速度参数值，供用户参考使用。

5. 刀具轨迹生成

型腔铣削采用跟随轮廓的方式走刀。可在 MasterCAM 软件中通过操作各种图形菜单来完成。

接下来定义加工的各种参数：安全平面、主轴转速、进给速度、线性逼近误差、刀具轨迹间的残留高度、切削深度、加工余量、进刀段长度及退刀段长度、工件几何尺寸及材料。即可利用软件自动生成刀具轨迹（图 6-59）。



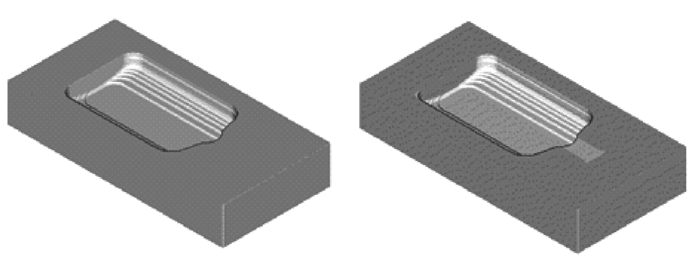
a)　　b)

图 6-59　定义了被加工面的分层和刀具轨迹

a）加工的分层　b）刀具轨迹图

6. 加工仿真

生成刀具轨迹后，可以进行仿真，刀具在毛坯上进行切削，最终得到的加工图形如图 6-60 所示。可通过它观察加工效果，以便真正进行加工。



a)　　b)

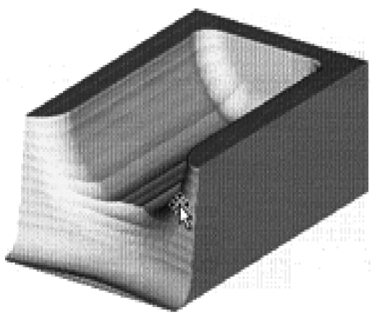
图 6-60　加工仿真结果

a）模拟加工过程（一）　b）模拟加工过程（二）

通过模拟加工过程可以看到：瓶颈部分基本上没有加工到（因刀具直径太大）。应对未加工到的瓶颈部分换一把小直径铣刀进行加工。为了将加工限制在一个范围内，尽可能减少刀具的空行程，人为设置一个虚构的毛坯，这样刀具就在该范围内运动，同前面的加工一样，最后生成该部分的刀具轨迹。

7. 刀位源文件输出

刀位文件如图 6-61 所示，其大部分为刀位数据，它是后处理的输入文件。



```
TOOL PATH/PMPOC1,TOOL,EM-.750-06
TLDATA/MILL,0.7500,0.0600,3.5000,0.0000,0.0000
MSYS/0.0000,0.0000,1.2500,1.0000000,0.0000000,0.
PAINT/PATH
PAINT/SPEED,8
PAINT/COLOR,4
RAPID
GOTO/3.5952,0.8900,-0.9000,0.0000000,0.0000000,1
PAINT/COLOR,6
FEDRAT/IPM,10.0000
GOTO/3.9684,0.8900,-1.0000
```

图 6-61　刀位源文件

8. 后置处理

通过配置的后置处理器，对刀位源文件进行处理，生成特定数控机床所需要的加工程序文件，可直接传给数控机床进行加工。

【知识拓展】

科学技术是不断发展的，人们对于设计技术和制造技术的需求不再单纯的独立，而是通过将计算机辅助设计技术与制造技术相互结合，集成化应用。尤其是近年来出现的计算机集成制造系统，其一体化的结合能够将 CAD 中设计生成的零件信息自动转换成 CAM 所需要的输入信息，避免信息数据的丢失。并且从实际生产操作来看，将产品设计、制造和加工统筹到一个程序中去，不但减少了不必要的工艺流程，更加提高了生产的效能。

CAD/CAM 集成制造系统是智能化、专家化系统的总和。该系统中储存着大量的信息数据，涉及生产厂家、工艺技术等相关方面的信息，数据库也会不断更新，使得进入生产环节后产品模型始终是最新的。专家系统在 CAD/CAM 中的应用表现在计算机辅助工艺设计中，如果系统没有在自身的数据信息范围之内找到符合条件的内容时，就会自动化地选择一个与所需的零部件相类似的数据后完成加工的过程。后期处理过程中，技术人员可以依照自身的实际需求，将未出现的数据选择性地添加到已有的数据库当中，以便以后需要的时候省去寻找这一步骤，简化了系统操作流程，提高了工作效率。

【本章小结】

MasterCAM 是美国 CNC Software INC 研制出来的一套计算机辅助制造系统软件，它将 CAD 和 CAM 这两大功能综合在一起，有利于实现 CAD 系统、CAPP 系统、CAM 系统的集成。在使用中要注意设计造型和加工造型的目的不同，设计造型是为了将产品的形状和配合

关系表达清楚，它要求的几何表达方式比较统一且必须是完整的，而加工造型是为了给加工轨迹提供几何依据，虽其基础是设计造型，但它的造型表现形式不一定会用统一的几何表达方式，可以是二维线框、三维曲面、三维实体或它们的混合体。

通过本章的学习，应当了解数控机床计算机辅助编程的以下步骤（图 6-62）：

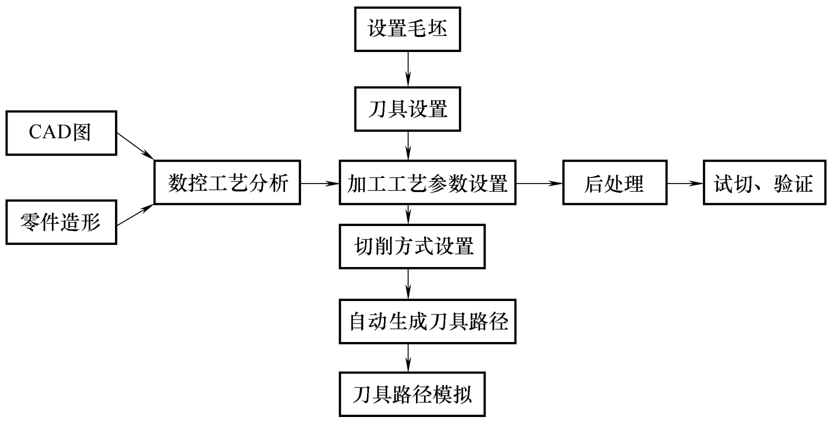


图 6-62　计算机辅助编程的步骤

1）加工零件及其工艺分析。
2）加工零件建模。
3）工艺参数输入。
4）刀具轨迹生成与编辑。
5）刀具轨迹的验证与仿真。
6）后置处理生成代码。

思考题与习题

6-1　常用数控机床编程的方法有哪些？各自的特点是什么？

6-2　数控程序中有哪些功能字？它们各自的功能有何不同？

6-3　什么是机床坐标系？什么是工件坐标系？它们是如何建立的？

6-4　简述数控加工编程的基本过程和主要内容。

6-5　什么是后置处理？图形交互式编程为什么要进行加工路径后置处理？经过后置处理的加工程序与手工编写的加工程序有何异同？

6-6　数控加工仿真有哪几种基本类型？各自的意义和作用是什么？

6-7　手工编程、APT 语言自动编程以及图形交互式编程各自的特点是什么？各用于什么类型的工件？

6-8　简要叙述基于 MasterCAM 进行数控编程的一般步骤。

第 7 章　数控机床的管理

【知识要点】

1. 数控机床的选用。
2. 数控机床的维护和保养。
3. 数控机床故障诊断与处理。

数控机床是现代企业进行生产的一种重要设备，是完成生产过程的重要技术手段。其特点是加工精度高、具有相对较好的柔性、自动化程度高等，在我国及其他国家都已经得到广泛应用。但是数控机床也有它的缺陷，当处在无故障加工状态时，其加工精度高、速度快，而一旦出现故障，则会引起一系列问题。就目前使用的情况而言，数控机床的故障率仍然居高不下，就连美国等在数控机床领域有优势的国家，其平均故障间隔时间（MTBF）也只占60%左右，即有40%左右的时间是维修或闲置。造成需要维修的原因是多方面的，其中在使用过程中，机床操作造成的问题占很大一部分。因此，加强对数控机床的管理是关键，结合“预防”与“治疗”是解决“使用难、维修难”的根本方法和唯一的途径。机床的精度和性能是影响机床使用寿命长短和效率高低的重要因素，而正确使用、维护和保养在很大程度上决定了机床的加工效率和寿命。

机床的正确使用和精心维护保养是贯彻设备管理以“预防”为主的重要环节。数控机床在生产加工中起着关键的作用，为充分发挥效率、增加生产量，必须加强使用管理并且精心维护。

7.1　数控机床管理的基本要求

先进的技术装备是一个企业提高生产能力的必要物质基础，而对技术装备进行合理地使用、维护、保养和及时地检修，保持其良好的技术状态，充分发挥其性能和效益是目的。要不断改进数控机床管理工作，合理配置，正确使用，精心保养和及时修理，才能延长有效使用时间，减少停机，以获得良好的经济效益，体现先进设备的经济意义。

7.1.1　数控机床管理的任务及内容

数控机床的管理要规范化、系统化及具有可操作性。数控机床管理和维护的基本要求可概括为“三好四会、四项要求、五项纪律”，同时要严格遵守数控机床操作维护规程，保证数控机床的使用环境清洁、干燥、最好恒温、无腐蚀、无振动，这是指导操作人员正确使用和维护设备的技术性规范。

1. “三好”即管好、用好、修好

1）管好数控机床。务必管好本单位所拥有的数控机床，对数控机床的数量、质量及其变动情况要掌握，合理地配置数控机床。严格遵守并贯彻实施关于设备的移装、调拨、借

用、出租、封存、报废、改装及更新的有关管理制度，保证设备的完整齐全，保持其完好和价值。操作人员必须管好自己使用的机床，未经批准不允许他人使用，杜绝无证操作现象。

2）用好数控机床。要求正确、合理及规范使用和精心维护机床，即要求应根据机床的能力投入生产，杜绝机床超性能、超负荷等类似的短期化行为。操作人员要严格遵守操作维护规程，在机床性能和能力范围内使用机床且实施文明、规范的操作步骤和操作手段；要坚持对机床进行精心的日常保养和定期维护，使数控机床保持“四项要求”的标准。

3）修好数控机床。车间安排生产时应考虑和预留计划维修时间，避免机床在非正常状态下运行。操作人员要配合维修人员修好机床，提高数控机床的各项技术经济指标。坚持保养、及时维修好数控机床。

2. “四会”即会使用、会保养、会检查、会排除一般故障

1）会使用。熟悉设备结构、技术性能和操作方法，懂得加工工艺。会合理选择切削用量，正确地使用设备。

2）会保养。按润滑图表的规定加油、换油，保持油路畅通无阻。会按规定进行一级保养，保持设备内外清洁，做到无油垢、无脏物，漆见本色铁见光。

3）会检查。检查与加工工艺有关的精度检验项目，并能进行适当调整。检查安全防护和保险装置。

4）会排除故障。能通过不正常的声音、温度和运转情况，发现设备的异常状态，并能判定异常状态的部位和原因，及时采取措施排除故障。

3. “四项要求”即整齐、清洁、润滑、安全

1）整齐。工件、附件放置整齐，安全防护装置齐全，线路管道安全完整。

2）清洁。设备内外清洁，各部位无油垢、无碰伤、不漏水、不漏油，垃圾切屑清扫干净。

3）润滑。按时加油、换油，油质符合要求；油壶、油枪、油杯齐全；毛毡、油线、油表清洁；油路畅通。

4）安全。实行定人、定机、凭证操作和交接班制度，遵守操作规程，合理使用、精心维护设备，安全无事故。

4. 五项纪律

1）凭证使用设备，严格遵守操作规程和安全技术规程。

2）保持设备清洁，并按规定涂油防锈，做到班前正确润滑设备、班中注意运转情况、班后清扫擦拭设备，没有完成润滑工作不开车，没有完成清洁工作不下班。

3）认真遵守设备的交接班制度，做好交接班记录及运行记录。

4）管好工具、附件，不得遗失，不允许脚踩床面，脚踏操作元件及电器开关。

5）不允许设备在运行时离开岗位，发现异常，立即停车检查，自己不能处理的应及时通知维修人员检修。

7.1.2　数控机床使用的初期管理

1. 初期管理的含义

数控机床使用的初期管理是指数控机床在安装试运转后从投产到稳定生产约半年时间内对机床的调整、保养、维护、状态监测、故障诊断以及对操作、维修人员的培训教育，维修技术信息的收集、处理等全部管理工作。其目的是：

1）使安装投产的数控机床能尽早达到正常稳定的良好技术状态，满足生产质量和效率的要求。

2）通过生产验证及时发现数控机床从规划、选型、安装、调试至使用初期出现的各种问题，尤其是对数控机床本身的设计、制造中的缺陷和问题进行反馈，以促进数控机床设计、制造质量的提高和改进数控机床选型、购置工作，并为今后的数控机床规划决策提供可靠依据。

2. 初期管理的主要内容

1）做好机床初期使用的调试，以达到原设计预期功能。

2）对操作、维修人员进行操作规范和技术能力的培训。

3）观察、记录、分析机床运行状态的变化以及机床结构、传动装置、操纵控制系统的稳定性和可靠性；跟踪加工质量、机床性能是否能达到设计规范和工艺要求。

4）考查机床对生产的适用性、生产效率、安全防护装置及能耗情况。

5）记录并分析机床发生故障的部位、次数、原因及故障间隔以及启用机床的次数、使用条件、零部件损伤和失效情况。对典型故障和零部件的失效进行分析，并提出解决方案；对发现的机床设计或制造的缺陷，提出改善维修策略和方案。

6）对使用初期的费用、效果进行技术经济分析和评价，反馈初期所收集的所有信息及其分析结果。

7）数控机床使用部门及其维修单位对新投产的机床要做好使用初期运行情况记录，填写使用初期信息反馈记录表并送交设备管理部门，由设备管理部门根据信息反馈和现场核查情况做出设备使用初期技术状态鉴定表，按照设计、制造、选型、购置、安装调试等方面分别向有关部门反馈，以改进今后的工作。

7.1.3 数控机床的使用要求

1. 培训数控机床使用人员

为了正确合理地使用数控机床，操作人员在独立工作前，必须经过基本知识和技术理论及操作技能的培训，内容包括：数控机床结构性能、数控机床工作原理、传动装置、数控系统技术特性、数控机床编程与操作、金属加工技术规范、操作规程、安全操作要领、维护保养事项、安全防护措施、故障处理原则等。在独立操作所使用的机床之前，必须经过熟练技师指导，进行实际操作训练，达到一定的熟练程度，才能独立操作所使用的数控机床。

2. 实行“定人、定机，持证操作制度”

数控机床必须由经考核合格并持职业资格证书的操作人员操作，严格实行定人、定机和岗位责任制，以确保正确使用数控机床和实施日常维护工作。多人操作的数控机床应实行机长负责制，由机长对使用和维护工作负责。公用数控机床应指定专人负责维护管理。

3. 建立岗位责任制

1）要求数控机床操作人员在做到“三好四会”要求下，做好日常维护和定期保养工作；配合维修人员检查维修操作设备，保管好设备附件和工具，并参加数控机床修后验收工作。

2）数控机床操作人员必须严格按“数控机床操作维护规程”“四项要求”“五项纪律”的规定正确使用与精心维护设备。

4. 建立交接班制度

连续生产和多班制生产的设备必须实行交接班制度，明确交班人员和接班人员各自的职责和责任。

7.2　数控机床的选用

数控机床是一种高效的机械加工设备，适用于单件、中小批量的生产，对于形状比较复杂、精度要求较高的零件加工和更新频繁、生产周期要求短的产品加工，数控机床较普通机床表现出明显的优势。但是，数控机床的初期投资及维修等费用昂贵，对管理和操作人员的素质要求也较高。用户如何才能够利用有限的资金从种类繁多、价格昂贵的设备中选择能为本单位充分使用的数控机床非常重要。

7.2.1　数控机床选用的一般原则

1. 实用性

选用数控机床目的主要是为了完成某些关键零部件或某些关键工序的加工。因此，企业在确定设备配置时，应首先根据实际需要和各种机床的经济适用场合，做出是否必须购置数控机床的投资决策。因此，选是为了用，这是最首要的。实用性就是要使选中的数控机床最终能最大程度地实现预定的目标。有了明确的目标，有针对性地选用机床，才能合理的投入，并获得最佳效果。

2. 经济性

经济性是指所选用的数控机床在满足加工要求的条件下，所支付的代价是经济的或是合理的。经济性往往是和实用性相联系的，机床选得实用，那么经济上也会合理。需要注意的是不要以高代价换来功能过多而又不实用的较复杂的数控机床，即注意性价比。

3. 可操作性

用户所选用的数控机床要与企业内的操作和维修水平相适应。选用了一台较复杂、功能齐全、较为先进的数控机床，如果没有适当的人去操作、没有熟悉的人员去维护修理，机床也发挥不了应有的作用。所以要注意相关人员的培养和配备，以提高数控机床的可操作性。

4. 稳定可靠性

可靠性是影响数控机床发挥效益的一个非常重要的要素，数控机床如果不能稳定可靠地工作，就没有任何意义。要保证数控机床工作时稳定可靠，在选用时一定要认真考察比较，广泛听取多数用户对其可靠性和稳定性的评价，吸取经验，或者向相关企业及机构咨询。

7.2.2　数控机床的选用

如何从品种繁多、价格昂贵的设备中选择适用的设备，如何使这些设备在机械加工中发挥最大限度的作用，如何正确、合理地选购与主机相配套的附件与软件，做到设备与功能不闲置不浪费，可以从以下几个方面入手。

1. 确定加工工件

考虑到数控机床品种多，而且每一种机床都有其最适合加工的典型零件。只有在一定的条件下，加工一定的工件才能达到最佳效果。因此选购数控机床首先必须确定用户所要加工的典型工件。

2. 机床规格的选择

根据典型被加工件选用相应规格的数控机床。数控机床的最主要规格有工作台尺寸、各个数控坐标轴的行程范围和主轴电动机功率。选用工作台尺寸应保证工件在上面能顺利装夹，被加工工件的加工尺寸应在各坐标有效行程内，机床的三个基本直线坐标（X、Y、Z）行程反映该机床允许的加工空间。一般情况下被加工工件的轮廓尺寸应在机床的加工空间范围之内；选用工作台面比典型零件稍大一些是考虑到安装夹具所需的空间。要考虑机床工作台的允许承载能力，以及在工作中，工件是否与机床换刀空间和护罩附件干涉等一系列问题。

3. 机床精度的选择

选择机床精度等级应根据被加工工件关键部位加工精度的要求来确定。

直线定位精度和重复定位精度，综合反映了轴上各运动部件的综合精度，尤其是重复定位精度，反映了该轴在全行程内任意点定位的稳定性，是衡量控制轴能否稳定工作的基本指标。目前的数控系统软件能对各环节系统误差进行稳定的补偿，由于随机误差和系统的集成性，即使是经过仔细的调整补偿，单轴定位重复性误差仍然存在。

对于加工较大尺寸零件的数控机床一般注重定位精度，而对中小型零件在考核加工尺寸的一致性时一般更注重重复定位精度。从机床的定位精度可估算出该机床在加工时的有关精度，而不同种类的机床的加工精度也不同。这些都是选择数控机床的一些基本参考因素。

4. 自动换刀装置（ATC）和刀库容量的选择及刀柄的配置

自动换刀装置（ATC）是加工中心、车削中心和带交换冲头数控压力机的基本特征，尤其是加工中心。它的工作质量直接关系到整机的质量，ATC 装置的投资往往占整机的 30% ~50%。选择刀柄需注意：刀柄必须与该机床主轴装夹部位相适应，及机械手夹持尺寸及刀柄的拉销尺寸相适应；对于部分不带刀具的产品，必须再配置相应的刀具和附件；综合考虑选用模块式刀柄和复合刀柄。

5. 数控系统的选用

为了能使数控系统与所需机床相匹配，在选择数控系统时应遵循以下基本原则：

1）根据数控机床类型选择相应的数控系统。数控系统分别适用于车、铣、镗、磨、冲压等加工，应有针对性的进行选择。

2）根据数控机床的设计指标选择数控系统。在可供选择的数控系统中，它们的性能高低差别很大。如日本 FANUC 公司生产的 15 系统的最高切削进给速度可达 240m/min（脉冲当量为 1 微米），而该公司生产的 0 系统的切削进给速度只能达到 24m/min，它们的价格相差很大。不宜片面地追求高水平、新系统，而应该对性能和价格等作一个综合分析，选用合适的系统。

3）根据数控机床的性能选择数控系统功能。一个数控系统具有很多功能，有的属于基本功能，有的属于选择功能，通常系统的功能越多机床价格就越贵。所以，对功能选择一定要根据机床性能需要来选择，避免功能浪费和成本过高。

4）订购数控系统时要考虑周全。订购时把需要的系统功能一次订全，不能遗漏，避免由于漏订而造成的损失。

6. 数控机床驱动电动机的选择

机床的驱动电动机包括进给伺服电动机和主轴电动机两大类。

1）进给驱动伺服电动机的选择。原则上应根据负载条件来选择伺服电动机。在电动机轴上所加的负载有两种，即阻尼转矩和惯量负载。电动机应满足以下条件：

① 机床作空载运行时，加在伺服电动机轴上的负载转矩应在“转矩-速度”特性曲线的连续工作区内。

② 最大负载转矩、加载周期及过载时间都应在提供的特性曲线的允许范围以内。

③ 伺服电动机在加速或减速过程中的转矩应在加减速区（或间断工作区）之内。

④ 对要求频繁起动、制动及周期性变化的负载，必须检查它在一个周期中的转矩均方根值，并应小于伺服电动机的连续额定转矩。

⑤ 加在伺服电动机轴上的负载惯量大小对伺服电动机的灵敏度和整个伺服系统精度将产生影响。

2）主轴电动机的选择。

① 所选择电动机应能满足机床设计切削功率要求。

② 根据要求的主轴加减速时间计算出的电动机功率不应超过电动机的最大输出功率。

③ 在要求主轴频繁起动、制动的场合，必须计算出平均功率，其值不能超过电动机连续额定输出功率。

④ 在要求有恒表面速度控制的场合，则恒表面速度控制所需的切削功率和加速所需功率两者之和应在电动机能够提供的功率范围之内。

7. 机床附件的选择

机床附件选择的基本原则是：全面配置、长远综合考虑。对一些价格增加不多，但对使用带来很多方便的，应尽可能配置齐全，且配置成套。

7.2.3　数控机床的选用步骤

数控机床的选用步骤可分为选用前的准备工作、初选、精选和终选几步。

1. 选用前的准备工作

选用前的准备工作主要是在有限的资金范围内确定机床要满足生产要求，包括确定加工对象的类型、加工范围、内容和要求、生产批量及坯料情况等；确定典型零件，进行数控加工的工艺分析；明确机床精度和功能方面的要求及购买数控机床的投资费用等，为购买到实用、经济的数控机床做准备。

2. 初选

做完了准备工作后，应广泛地收集国内外有关数控机床的信息资料，在众多数控机床中选出几种满足要求的设备。

3. 精选和终选

初选了几种满足要求的设备之后，应向该设备的生产厂家索取更详细的资料，进一步了解该产品的情况，并广泛征求各个方面专家的意见，必要时可作加工试验，促进选择。也可将初拟的机床类型、规格和性能与生产厂家共同商讨，以求更加合理。同时应考虑产品供货情况，通过多方面比较分析后，选择理想的机型和厂家。

7.3　数控机床的维护和保养

数控机床都是企业的重点、关键设备，要发挥数控机床的高效益，只有正确的操作

和精心的维护。正确的操作使用能防止机床非正常磨损，避免突发故障；精心的维护可使机床保持良好的技术状态，延缓劣化进程，及时发现和消灭故障隐患于未然，从而保障安全运行。

7.3.1 数控机床的维护概述

按照数控机床维护的时间间隔，可将数控机床的维护分为日常维护和定期维护，日常维护又分为每班维护和周末维护。从数控机床的组成系统出发，数控机床的维护又可以分为机械系统的维护、辅助系统（液压系统、气压系统、电气系统）的维护以及数控系统的维护等几个方面，本节将对以上几个方面进行详细阐述。

1. 数控机床的日常维护

（1）每班维护　班前要对工作场地进行清理工作并对设备进行点检，查看操作手柄、安全装置、控制装置、电源等是否存在异样，检查油箱、液压装置及润滑装置的油质、油量，并按规定加油，各项目确认无误后，先空车低速运转，待润滑情况及各部位正常后方可进行工作。下班前用一定的时间清扫擦拭机床设备，切断电源，在设备滑动导轨部位涂油，清理工作场地，保持设备整洁。

（2）周末维护　在每周末和节假日前，要彻底地清洗设备，清除油污，达到维护的“四项要求”，并组织维修组检查、评分考核，公布评分结果。

2. 数控机床的定期维护

数控机床定期维护是在维修人员的辅导配合下，由操作人员进行的定期维修作业，按设备管理部门的计划执行。设备定期维护后要组织维修组逐台验收，设备管理部门抽查，作为对车间执行计划的考核。按照维护的时间间隔，可将数控机床的定期维护分为每月维护、每两月维护、每季维护、每半年维护等。

7.3.2 机械系统的维护和保养

数控机床的机械结构较传统机床的机械结构简单，但机械部件的精度提高了，且对维护提出了更高要求。同时，由于数控机床还有刀库及换刀机械手，液压和气动系统等，使得机械部件维护的面更广，工作量更大。数控机床机械部件维护与传统机床不同的内容有以下几个方面：

1. 主传动链的维护和保养

1）掌握机床设备主传动链的结构、性能和主轴调整方法，严禁超性能、超负荷运行。出现非正常现象时，应立即停机解决。

2）定期检查调整齿形带，不易过紧过松，防止出现断裂现象。

3）定期检查调整主轴箱的温度、主轴润滑恒温油箱的温度、冷却系统的温度、主轴箱平衡系统、压缩空气压力、刀具夹紧装置。

4）定期检查并补充空压系统中油雾器、油箱中的油量。

5）定期检查防护罩的密封情况、主轴及液（气）压缸活塞的移动位置。

6）至少一年更换一次润滑油，检查并清洗过滤器。

7）保持主轴齿轮箱润滑。

2. 滚珠丝杠螺母副的维护和保养

1）定期检查并调整丝杠螺母副的轴向间隙、丝杠负荷、丝杠支承与床身连接的松紧情况。

2）检查并更换损坏的支承轴承。

3）对于采用润滑脂润滑的滚珠丝杠，至少每半年清洗一次丝杠上的旧润滑脂，换上新的润滑脂。用润滑油润滑的滚珠丝杠，每次机床工作前加油一次。

4）注意避免硬质灰尘或切屑进入丝杠防护罩和工作中碰击防护罩，防护装置一有损坏要及时更换。

3. 刀库及换刀机械手的维护和保养

1）确保刀具装到位、牢靠，锁紧机构可靠，若出现故障立即停机处理。

2）严禁把超重、超长的刀具装入刀库，防止在机械手换刀时掉刀或刀具与工件、夹具等发生碰撞。

3）采用顺序选刀方式时，务必检查刀具在刀库上的顺序是否正确。其他选刀方式也要注意所换刀具号是否与所需刀具一致，防止换错刀具导致事故发生。

4）保持刀具刀柄和刀套、主轴锥孔清洁。

5）经常检查刀库的回零位置、主轴回换刀点位置，若异常应及时调整，使机床能正常完成换刀动作。

6）加工之前，应先使刀库和机械手空运行，检查各部分工作是否正常。

4. 机床导轨的维护和保养

机床导轨的维护与保养主要是导轨的润滑和防护。

1）导轨的润滑。导轨润滑的目的是减少摩擦阻力和摩擦磨损，以避免低速爬行和降低高温时的温升，因此导轨的润滑很重要。对于滑动导轨，采用润滑油润滑；而滚动导轨，则润滑油或者润滑脂均可。每天检查导轨润滑油箱油量、润滑油泵是否能够定时起动和停止、定时起动时是否能够提供润滑油。

2）导轨的防护。在操作使用中要注意避免切屑、磨粒或者切削液散落在导轨面上，否则会引起导轨的磨损加剧、擦伤和锈蚀。因此要定期检查导轨的清洁、润滑及磨损情况，适时调整导轨的润滑参数。

7.3.3　辅助系统的维护和保养

数控机床的辅助系统主要包括：液压系统、气动系统、自动换刀装置、数控分度头等。本节主要对液压、气动系统的维护与保养进行介绍。

1. 液压系统维护和保养

1）检查油液质量，定期过滤或更换油液。

2）定期检查冷却器和加热器的工作性能，调整液压系统中油液的温度。

3）定期检查清洗或更换液压件、滤芯、密封件、油箱和管路，防止泄露。

4）检查系统的泄漏、噪声、振动、压力、温度等是否正常，防止产生故障。

2. 气动系统维护

1）选用合适的过滤器，清除压缩空气中的杂质和水分。

2）注意检查系统中油雾器的供油量，保证空气中含有适量的润滑油来润滑气动元件，防止生锈、磨损。

3）定期检查、清洗或更换气动元件、滤芯、密封件。

4）查看、调节工作压力，保证气动装置具有合适的工作压力和运动速度。

3. 电气控制系统的维护和保养

数控机床电气控制系统除了 CNC 装置（包括主轴驱动和进给驱动的伺服系统）外，还包括机床强电控制系统。机床强电控制系统主要是由普通交流电动机和机床电器逻辑控制装置 PLC、操作盘以及继电器、接触器等部分构成。

机床强电控制系统维护与保养工作主要是如何采取措施防止强电柜中的接触器、继电器的强电磁干扰的问题。由于交流接触器、交流电动机的频繁起动、停止，其电磁感应现象会使 CNC 系统控制电路中产生尖峰或波涌等噪声，干扰系统的正常工作。因此，一定要对这些电磁干扰采取措施，予以消除。要注意防止接触器、继电器触头的氧化和触头的接触不良等。

由于 PLC 的结构组成与数控装置有相似之处，所以其维护与保养可参照数控装置的维护与保养。

7.3.4 数控系统的维护和保养

数控系统经过一段较长时间的使用，某些元器件性能总要老化甚至损坏，有些机械部件更是如此。为了尽量延长元器件的寿命和零部件的磨损周期，防止各种故障，特别是恶性事故的发生，必须对数控系统进行日常的维护工作。具体的日常维护保养要求，在数控系统的使用、维修说明书中都有明确的规定。概括起来，要注意以下几个方面。

1. 严格遵守操作规程和日常维护制度。
2. 应尽量少开数控柜和强电柜的门，减少空气中漂浮的灰尘和金属粉末对元器件的污染和损坏，对于已受外部尘埃、油雾污染的电路板和接插件可采用专用电子清洁剂喷洗。
3. 定时清扫数控柜的散热通风系统，调整工作温度到最佳。
4. 数控系统输入输出装置的定期维护。
5. 定期检查、清洗或更换直流电动机电刷和换向器。
6. 检查 CNC 装置用的电网电压，允许电网电压相对额定值有 ±10% 波动。
7. 定期检查和更换系统存储器电池。
8. 数控系统长期不用时应定期通电，至少应保证每 5 天通电一次，每次运行 14 小时左右，以防止机床电器元件受潮，并能及时发现有无电池报警信号。
9. 备用印制线路板的定期通电。

7.4 数控机床故障诊断与处理

数控机床是一个复杂的系统，既有机械装置、液压系统，又有控制部分。由于种种原因，数控机床不可避免地会发生不同程度、不同类型的故障，导致数控机床不能正常工作。

本节首先介绍数控机床故障诊断与处理的基本概念，然后介绍常见故障的分类，了解了故障性质，也就更便于维修；随后介绍排除故障的思路和原则，有了正确的思路，问题就能迎刃而解；最后介绍维修的基本步骤以及机床的维护。

7.4.1 数控机床故障诊断与处理的基本概念

1. 数控机床可靠性与故障

数控机床可靠性是指数控机床在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

数控机床故障是指数控机床在规定条件下和规定时间内丧失了规定的功能。

2. 平均故障间隔时间 MTBF

它是指数控机床在使用中两次故障间隔的平均时间，即数控机床在寿命范围内总工作时间和总故障次数之比。

3. 平均修复时间 MTTR

它是指数控机床从出现故障开始直至能正常使用所用的平均修复时间。

4. 有效度 A

这是从可靠度和可维修度方面对数控机床的正常工作概率进行综合评价的尺度，是一台可维修的机床，在某一段时间内，维持其性能的概率。

5. 故障的机理

故障机理是指诱发零件、部件、系统发生故障的物理、化学、电学与机械学过程，也可以说是形成故障的本质原因。故障机理还可以表述为数控机床的某种故障在达到表面化之前，其内部的演变过程及其因果关系。在研究故障机理时，需要考察的基本因素至少有 3 个。

（1）对象　指故障件本身的内部状态与结构对故障的诱发作用，即内因的作用。

（2）原因　能引起设备与系统发生故障的破坏因素，如动作应力、环境应力、人为的失误以及时间因素等故障诱因。

（3）结果　产生的异常状态，或者说对象在原因的作用下，其状态超过某种界限，就发生故障。对象加原因引起结果。

7.4.2　按数控机床发生故障的性质分类

数控机床的故障包括机械系统、数控系统和伺服系统等方面的故障。数控机床发生故障的原因一般都比较复杂，这给故障诊断和排除带来不少困难。为了便于故障分析和处理，本节按故障发生的可能性、发生故障时有无报警显示及故障原因等对常见故障作如下分类：

1. 按故障发生的可能性分为系统性故障和随机性故障

（1）系统性故障　系统性故障是指系统一旦满足某种条件或超过某一设定，工作中的数控机床必然会发生的故障。这一类故障现象极为常见。例如：液压系统的压力值随着液压回路过滤器的阻塞而降到设定参数时，必然会发生液压系统故障报警使数控机床断电停机。

（2）随机性故障　随机性故障，通常指在完全相同的条件下，故障不一定会发生的情况。因此，随机性故障的原因分析与故障诊断较其他故障困难得多。

2. 按数控机床发生故障时有无报警显示分类

（1）有报警显示的故障　这类故障又可分为硬件报警显示与软件报警显示两种。

1）硬件报警显示的故障。硬件报警显示指各单元装置上的警示灯有指示，如控制操作面板、位置控制印制线路板、伺服控制单元、主轴单元、电源单元等部位上常设有这类警示灯。当系统出现了故障后，借助相应部位上的警示灯可大致分析判断出故障发生的部位与性质，为故障分析、诊断带来极大方便。

2）软件报警显示的故障。软件报警显示通常是指显示屏上显示出来的报警号和报警信息。数控系统具有自诊断功能，一旦检测到故障，即按故障的级别进行处理，同时在显示屏

上以报警号的形式显示该故障信息。常见的软件报警故障有存储器警示、过热警示、伺服系统警示、轴超程警示、程序出错警示、主轴警示、过载警示以及短路警示等。

（2）无报警显示的故障　这类故障发生时无任何硬件或软件的报警显示，因此分析诊断难度较大。对于无报警显示故障，通常要具体情况具体分析，要根据故障发生的前后变化状态进行分析判断。

3. 按数控机床发生故障的原因分类

（1）数控机床自身故障　这类故障的发生与外部使用环境条件无关，是因数控机床自身原因引起的。数控机床所发生的绝大多数故障均属此类故障。

（2）数控机床外部故障　有些故障并非由机床本身而是由外部原因所造成的，这类故障就是外部故障。例如，数控机床的供电电压、温度、气体、潮气、粉尘、振动和干扰以及人为因素所造成的故障。

除上述常见故障分类外，还可按故障发生时有无破坏性分为破坏性故障和非破坏性故障；按故障发生的部位分为数控装置故障、进给伺服系统故障、主轴系统故障、刀架、刀库、工作台故障等；按照发生过程又可以分为：突然故障和渐变故障。从起因来分，可分为关联和非关联性故障。

7.4.3　CNC 系统诊断技术

数控系统是技术密集型的产品，要想迅速而准确地查明原因并确定故障部位，不借助于诊断技术是非常困难的，有时甚至是不可能的。随着微处理机的不断发展，诊断技术也由简单的诊断朝着多功能的高级诊断或智能化诊断的方向发展，诊断能力的强弱已是评价当今 CNC 系统性能的一项重要指标。CNC 系统故障诊断技术分为自诊断技术和高级诊断技术两大类。

1. 自诊断技术

当前使用的 CNC 系统的自诊断技术归纳起来大致可分为起动诊断、在线诊断以及离线诊断三类。

（1）起动诊断　所谓起动诊断是指 CNC 系统从通电开始至进入正常的运行准备状态之前，系统内部诊断程序自动执行的诊断。诊断的内容为系统中关键的硬件和系统控制软件，如 CPU、存储器、I/O 单元等模块以及 CRT/MDI 单元、软盘单元等装置或外部设备。有的 CNC 系统起动诊断程序还能对配置进行检查，用以确定所有指定的设备、模块是否都已正常地连接，甚至还能对某些重要的芯片，如 RAM、ROM、LSI（专用大规模集成电路）是否插装到位、选择的规格型号是否正确进行诊断。只有当全部项目都确认正确无误之后，整个系统才能进入正常运行的准备状态。否则，CNC 系统将通过 CRT 画面或用硬件（如发光二极管）报警方式指出故障信息。此时，起动诊断过程不结束，系统不能投入运行。上述起动诊断程序约在数秒钟结束，一般不会超过一分钟。例如，FANUC 公司的 FANUC II 系统的起动诊断程序在执行时，在系统主板上的七段显示器反映出诊断结果，在诊断执行过程中按：9—8—7—6—5—4—3—2—1 的过程变化。在正常结束时将停在 1 的位置。在每次数字变化过程中反映出不同的检查内容。其中：

9—对 CPU 进行复位，并开始执行诊断指令。

8—进行 RAM 试验检查。如出错，则显示 B，表示 RAM 检查出错。

7—对 RAM 进行清除，亦即将内容清除为 0，为正常运行做好准备。

6—对 BAC 芯片（总线随机控制）进行初始化，如果检查通不过，显示 A，说明主板与 CRT 之间传输有问题。如显示 C，表示有不用的单元被连接，亦即板接错了。如显示 F，表示 I/O 板或连接用的电缆出错。如显示 H，表示所连的连接单元识别号不对。如显示 c，表示光缆传输出错。如显示 J，表示 PLC 或接口转换未输出信号。

5—对 MDI 进行检查。

4—对 CRT 进行初始化。

3—显示初始化画面（如软件系列号、版本号等）。此时，如显示 L，表示 PLC 未通过检查，亦即 PLC 控制软件有误。如显示 O，则是系统未通过初始化，表示系统的控制软件有问题。

2—表示完成系统的初始化工作。

1—表示系统可以正常运转。如此时，不是显示 1 而是 E，则表示系统出错，即系统的主板或 ROM 板上硬件有故障或是 CNC 控制软件有故障。

在一般情况下，CRT 也将显示出报警信息，但当故障与显示功能有关时，CRT 就不能显示报警信息，只能依靠七段显示器的显示来判断。

（2）在线诊断　在线诊断是指通过 CNC 系统的内装程序，在系统处于正常运行状态时，对 CNC 系统本身以及与 CNC 装置相连的各个伺服单元、伺服电动机、主轴伺服单元和主轴电动机以及外部设备等进行自动诊断、检查。只要系统不停电，在线诊断就伴随着系统工作的整个过程，不会停止。

在线诊断的内容很丰富，一般说来，包括自诊断功能的状态显示和故障信息显示两部分。其中自诊断功能的状态显示有上千条，常以二进制的 0 或 1 来表示状态。借助状态显示可以判断出故障发生的部位。包括 CNC 内部程序监控和通过外部设备监控两种形式，前者又包括接口显示、内部状态显示以及故障信息显示三方面内容：

1）接口显示。接口显示能显示出 CNC 和 PLC，或 CNC 和机床之间的接口状态以及 CNC 内部状态是接通还是断开，通过这个诊断功能可辨别故障是发生在数控系统内部还是发生在 PLC 或机床上。

2）内部状态显示。它可显示的内容主要有以下几方面：

① 外因造成不执行指令的状态显示。如 CNC 系统是否处于“到位检查”中；“主轴工转信号”是否将进给速度倍率设定为 0%；是否处于机床锁住状态；是否处于等待速度到达信号接通；在螺纹切削时，是否处于等待主轴信号；在主轴每转进给时，等待位置编码器的旋转信号等。

② 位状态显示。如系统是否处于急停状态或是处于外部复位信号接通状态等。

③ TH 报警状态显示。即纸带水平和垂直校验，显示出报警时的纸带错误孔的位置。

④ 存储器内容及磁盘存储器异常状态的显示。

⑤ 位置偏差量的显示。

⑥ 旋转变压器或感应同步器的频率检测结果显示。

⑦ 伺服控制信息显示。

⑧ 存储器内容显示。

3）故障信息显示。故障信息显示的内容一般有上百条，多的可达 600 条。许多信息都以报警号和适当文字注释的形式出现，具体的内容和解决方法等可以查阅相关的说明

资料。故障信息显示有热报警类、系统报警类、存储器报警类、编程/设定故障报警类、伺服故障报警类、行程开关报警类以及印刷线路板间的连接故障报警类等内容。

（3）离线诊断　当 CNC 系统出现故障或要判定系统是否真有故障时，往往要停止加工或停机做检查，这就叫离线诊断（或称脱机诊断）。离线诊断的主要目的是故障定位，力求把故障定位在尽可能小的范围内。例如缩小到某个具体的模块、印刷线路板或板上的某部分电路，甚至某个芯片或器件。离线诊断可以在现场，也可以在维修中心或 CNC 系统制造厂进行。

2. 高级诊断技术

（1）远程诊断　也称通讯诊断，当系统出现故障后，维修维护人员通过网络和数据接口，获得故障现象等原始相关信息，并远程对故障信息进行分析、处理确定故障部位及故障原因，远程指导故障移除，维修人员不必到现场。该方法既可以用于故障发生后的诊断，又可以用于系统的定期预防性诊断，分析出可能存在的故障隐患。

（2）自修复系统（换备用模块）　所谓自修复系统就是在系统内设置有备用模块，一旦出现故障，在 CRT 上显示故障信息，同时立即查找并启用可用的备用模块替代故障模块，从而使系统较快地进入正常工作状态。

（3）具有 AI（人工智能）功能的专家故障诊断系统　所谓专家系统是指：通过提取专家知识，转化为标准语言描述的知识库，形成具有逻辑结构的推理规则，并借助推理机，以计算机为基础，实现具有等同专家诊断的系统。FANUC 公司已将专家系统引入部分系统中，用于故障的诊断。专家系统的构成如图 7-1 所示。

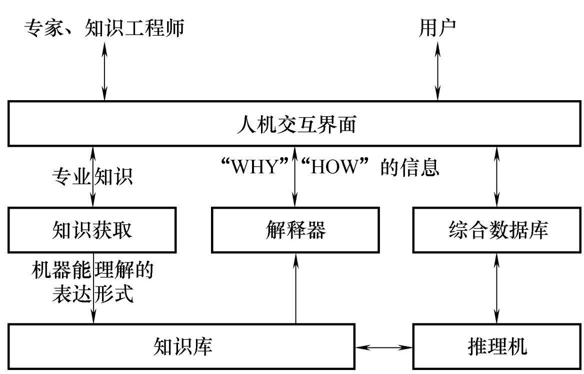


图 7-1　专家系统构成

7.4.4　数控机床故障诊断的步骤及方法

1. 数控机床故障诊断的步骤

当故障发生时，要尽可能地保持机床的状态不变，并对出现的故障现象、故障发生的操作方式及内容、机床各部分的状态和位置、报警号与故障指示灯的状态和显示内容做好详细的记录，并对现场是否出现了突发情况或偶然因素，如突然停电等进行记录。

当机床发生故障时，千万不要因为部分表面现象和主观臆断乱查一通，要进行全面分析，确定查找故障源的方法和手段，否则可能会使后果更严重。故障类型的不同，故障诊断的方法也不一样，但其一般步骤是相同的。一般按下列步骤进行：

1）了解故障的详细情况、调查故障现场，充分掌握故障信息并做好相关的记录。例

如，发生故障时，当前的机床主轴处于什么位置、数控系统处于怎样的工作状态和工作方式及其诊断结果如何，硬件和软件报警器的状态，确定在何种指令、何种操作、何种速度下发生的故障及其他相关信息的确认。

2）根据了解到的故障详细情况进行故障分析，缩小故障部位的范围并逐一列出可疑的故障部位。对于难以用简单的方法查找到故障部位的故障，需借助有关资料，确定故障源的范围。

3）由表及里、由现象到本质进行故障源查找，得到故障原因并制定故障解决的方案。在分析故障原因时要注意综合考虑数控系统、强电部分、机械、液压、气压传动等可能引发故障的原因并将解决方案逐一罗列出来，进行综合判断和筛选，预测故障原因并拟定检查的内容、步骤和方法，制定故障排除方案。

4）检测故障，逐级定位故障部位，根据预测的故障原因和解决方案，试验并定位故障部位，最终找出发生故障的真正部位。

5）故障的解除。根据故障部位及发生故障的准确原因，应采用合理的故障解决方法，修复数控机床，尽快让数控机床投入生产。

6）整理相关文档资料。故障解决后，应迅速恢复机床现场，并做好相关资料的整理工作，便于为后续维护和维修提供依据和参考。

2. 数控机床故障诊断的方法

故障诊断的方法包括直观法、自诊断功能法、功能程序测试法、交换法、转移法、检查参数法、测量比较法、敲击法、局部升温法、原理分析法等基本方法。

1）直观法。这是一种最基本的方法。具有丰富维修经验的人员通过观察系统部件及故障时出现的光、声、味等异常现象，将故障范围缩小到一定范围内。

2）自诊断功能法。利用数控系统的自诊断功能能随时监视数控系统的硬件和软件的工作状况，一旦发现异常，立即在 CRT 上显示报警信息或用发光二极管指示出故障的大致起因和大致位置。

3）功能程序测试法。所谓功能程序测试法就是将数控系统的常用功能和特殊功能编制成一个功能测试程序，输入数控系统中，在数控系统中运行该程序以检查机床执行这些功能的准确性和可靠性，从而查找故障发生的可能原因。

4）交换法。所谓交换法就是在分析出故障大致起因的情况下，利用备用的零部件或元器件替换有疑点的部分，从而确定故障部位，该方法具有简单易行的特点。但在交换备用件之前，要确定备用件完好且状态应与原板状态完全一致。

5）转移法。所谓转移法就是将 CNC 系统中具有相同功能的两块线路板、模板、集成电路芯片或元器件互相交换，观察故障现象是否随之转移，这个方法实际上就是交换法的一种。

6）检查参数法。根据故障特征，检查和校对有关数控参数，该方法适用于长期闲置出现故障或者长期运行而导致零部件的磨损、性能发生变化造成的机床故障的检查。

7）测量比较法。当印刷线路板上有多个检测用的端子时，可以利用这些端子比较测量正常的印刷线路板和有故障的印刷线路板之间的差异，分析故障的起因及故障的所在位置。

8）敲击法。当 CNC 系统出现的故障不稳定时，可用敲击法检查出故障的部位。该方法

适用于因虚焊或接触不良引起的故障。

9）局部升温法。当 CNC 系统元器件有一定程度的老化、变坏但又尚未完全损坏时，故障不稳定，此时可对被怀疑的元器件进行局部升温，加速其老化，以便明确故障部件。注意不要将本身完好的器件烤坏。

10）原理分析法。根据 CNC 系统的组成原理，可从逻辑上分析各点的逻辑电平和特征参数（如电压值或波形），然后借助测量分析仪器和工具，如万用表、逻辑笔、示波器或分析仪等，进行测量、分析和比较，从而确定故障部位。这种方法要求维修人员对于系统或电路原理的知识较高。

除了以上常用的故障检查测试方法外，还有拔板法\电压拉偏法\开环检测法等多种，这些检查方法各有特点。按照不同的故障现象，可以同时选择几种方法灵活应用，对故障进行综合分析，才能逐步缩小故障范围，较快地排除故障。

在故障诊断及处理时，除了要掌握以上的故障诊断步骤和方法外，还应遵守先方案后操作（或先静后动）、先检查后通电、先软件后硬件、先外部后内部、先机械后电气、先公用后专用、先简单后复杂、先一般后特殊等原则。

总之，在数控机床出现故障后，要依据故障的难易程度，以及故障是否属于一般性故障，合理采用不同的分析问题和解决问题的方法。

7.4.5 数控机床常见故障诊断及处理

1. 数控机床机械故障

（1）刀架、刀库及换刀装置　刀架、刀库及换刀装置常见的故障及排除方法见表 7-1。

表 7-1　刀架、刀库及换刀装置常见的故障及排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	刀具不能夹紧	气泵或液压泵压力不足	使气泵或液压泵压力增加
		增压漏气	关紧增压
		刀具卡紧液压缸漏油	更换密封装置
		刀具卡紧弹簧上的螺母松动	拧紧/卡紧弹簧上的螺母
2	刀具夹紧不能松开	锁刀弹簧压合过紧	调节锁刀弹簧上的螺母，使其最大载荷不超过额定数值
3	刀套不能夹紧刀具	检查刀套上的调节螺母	旋紧刀套两端的调节螺母，压紧弹簧，顶紧卡紧销
4	刀具从机械手中脱落	刀具超重	刀具不得超重
		机械手卡紧销损坏	更换机械手卡紧销
5	机械手换刀速度过快	气压太高或节流阀开口过大	保证气泵或液压泵的压力和流量，旋转节流阀至换刀速度合适
6	换刀时发生掉刀	主轴箱没有到换刀位置或换刀点漂移，机械手抓刀时没抓住	调整主轴箱使其回到换刀位置，调整机械手手臂

（2）主轴部件　主轴部件常见故障及排除方法见表 7-2。

表 7-2　主轴部件常见故障及排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	加工精度达不到要求	机床在运输过程中受到冲击	检查对机床精度有影响的各部位，尤其是导轨刷，并按出厂要求重新调整或修复
		安装不牢固、安装精度低或有变化	重新调平、紧固
2	切削振动大	主轴箱和床身连接螺钉松动	调整机床，恢复精度后紧固连接螺钉
		轴承预紧力不够、间隙过大	重新调整轴承间隙、但预紧力不宜过大
		轴承拉毛或损坏	更换轴承
		轴承预紧螺母松动，使主轴窜动	紧固预紧螺母和放松螺母，确保主轴精度合格
		主轴与箱体精度超差	修理主轴或箱体，使其配合精度、位置精度达到要求
		其他因素	检查刀具或切削工艺问题
3	主轴箱噪声大	主轴部件动平衡不好	重做动平衡
		齿轮啮合不均匀或严重损伤	修理、调整间隙或更换齿轮
		轴承损坏或传动轴弯曲	修复或更换轴承，调校传动轴
		传动带长度不一致或松动	调整或更换传动带，不能新旧混用
		齿轮精度差	更换齿轮
		润滑不良	调整润滑油量，保持主轴箱的清洁度
4	主轴无变速	电气变档信号是否输出	电气人员检测处理
		压力是否足够	检测并调整工作压力
		变档液压缸磨损或卡死	修去毛刺和磨伤
		变档液压缸窜油或内泄	更换密封圈
		变档电磁阀卡死	检查并清洗电磁阀或者修复、更换电磁阀
5	主轴不转动	主轴转动指令是否输出	电气人员检测修理
		保护开关没有压合或失灵	检修或更换压合保护开关
		卡盘末卡紧工件	调整或修理卡盘
		变档复合开关损坏	更换复合开关
		变档电磁阀体内泄露	更换电磁阀
		主轴转速过高引起轴承咬死现象	适当降低主轴转速
6	主轴发热	主轴轴承预紧力过大	调整预紧力
		轴承磨损或损坏	更换轴承
		润滑油污染或有杂质	清洗主轴箱，更换新润滑油

（3）滚珠丝杠副　滚珠丝杠副常见故障及排除方法见表7-3。

表7-3　滚珠丝杠副常见故障及排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	被加工工件粗糙度大	导轨润滑油不足，致使溜板爬行	加润滑油，排除润滑故障
		滚珠丝杆有局部拉毛或磨损	更换或修理丝杠
		丝杠轴承损坏，运动不平稳	更换损坏轴承
		伺服电动机未调整好，增益过大	调整伺服电动机控制系统
2	反向误差大，加工精度不稳定	丝杠联轴器锥套松动	重新紧固
		丝杠轴滑板配合压板过紧或过松	重新调整或修研
		丝杠轴滑板配合楔铁过紧或过松	重新调整或修研
		丝杠支承座的轴承预紧力过紧或过松	调整预紧力，检查轴向窜动值
		滚珠丝杆螺母端面与结合面不垂直或结合过松	修理调整或加垫片
		滚珠丝杆制造误差大或轴向窜动	消除间隙
		润滑油不足或没有	调节至各导轨面均有润滑油
		其他机械干涉	排除干涉部位
3	滚珠丝杠在运转中转矩过大	滑板配合压板过紧或磨损	重新调整或修研
		滚珠丝杆螺母反向器损坏，滚珠丝杠卡死或轴端螺母预紧力过大	修复或更换丝杠并重新调整
		丝杠磨损	更换
		伺服电动机与滚珠丝杠连接不同轴	调整同轴度并紧固连接座
		无润滑油	调整润滑油路
		超程开关失灵造成机械故障	检查故障并排除
		伺服电动机过热报警	检查故障并排除
4	丝杠螺母润滑不良	分油器是否分油	检查定量分油器
		油管是否堵塞	排除污物使油管畅通
5	滚珠丝杠副噪声	滚珠丝杠轴承压盖压合不良	调整压盖，使其压紧轴承
		滚珠丝杠润滑不良	检查分油器和油路
		滚珠破损	更换滚珠
		电动机与丝杠联轴器松动	拧紧联轴器锁紧螺钉

2. 控制系统的故障诊断

数控装置控制系统故障主要利用自诊断功能报警号，计算机各板的信息状态指示灯，各关键测试点的波形、电压值，各有关电位器的调整，各短路销的设定，有关机床参数值的设定，专用诊断元件，并参考控制系统维修手册、电气图册等加以排除。控制系统部分常见故障见表7-4。

表 7-4　控制系统部分常见故障及排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	电池报警故障	电池到了使用寿命，其电压低于允许值时	更换新的或备用电池
2	键盘故障	相关字符不能输入、不能消除、程序不能复位或显示屏不能变换页面	修复或更换
		不见成效或者所用按键都不起作用	检查修正接口电路、系统控制软件及电缆连接状况
3	熔丝故障	数控系统进行测量时的误操作	更换
		机床发生了撞车等意外事故	
4	刀位参数更改	机床的突然断电或因意外操作了急停按钮	核对并设置刀位参数，使控制系统内存刀位号与实际刀库位置一致
		撞车或打刀	
5	NOT READY（没准备好）	交流电源、直流电源的电压值不正常	修正电压值
		熔丝熔断、断路器跳闸等问题	更换
		电动机过热	调整负载、清洗电动机的冷却系统，查看冷却系统的连接情况
		大功率晶体管组件过电流	调整电流
		其他因素	根据 CRT 显示面板上是否有其他故障指示灯亮及故障信息提示解决
6	机床参数故障	备用电池失效	换用备用电池并重新设置参数
		突然停电	重新设置机床参数的修改
		操作者的误操作	重新设置机床参数的修改
7	软超程故障	限位开关有干扰	检查并除去干扰源
		加工程序有误	检查并修改加工程序
8	CRT 显示装置的亮度不够	显示器老化	更换显示器
		显示器灯管老化	更换显示器灯管
		显示控制模块故障	更换显示控制模块
		亮度调节太暗	调亮
9	CRT 无显示	信号线电缆或电源线连接不良或断线	查看或更换连接并使其连接良好
		电源单元故障，显示器无供电电源	更换电源
		CRT 显示板、显示器损坏	更换
		主印刷电路板故障	维修或更换
		LED 屏幕、灯管或逆变器损坏	更换
		亮度调节不适	亮度调节

3. 伺服系统的故障

伺服系统故障可利用CNC控制系统自诊断的报警号、CNC控制系统及伺服放大驱动板上的各信息状态指示灯、故障报警指示灯，参阅有关维修说明书上介绍的关键测试点的波形、电压值，CNC控制系统、伺服放大板上有关参数的设定、短路销的设置及相关电位器的调整，功能兼容板或备板的替换等方式来解决。比较常见伺服系统的故障见表7-5。

表7-5　伺服系统常见故障及排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	伺服超差（机床的实际进给值与指令值之差超过限定的允许值）	CNC控制系统与驱动放大模块之间，CNC控制系统与位置检测器之间，驱动放大器与伺服电动机之间的连线不正确	检查并保证连线正确、可靠
		位置检测器的信号及相关的D-A转换电路问题	检查并解决问题
		驱动放大器输出电压问题	修理或更换
		电动机轴与传动机械间配合问题，有松动或间隙	调整间隙或松紧程度
		位置环增益不符合要求	调整有关电位器
2	机床停止时，有关进给轴振动	高频脉动信号、波形及振幅不符合要求	调节有关电位器
		伺服放大器速度环的补偿功能不合适	调节补偿用电位器
		位置检测用编码盘的轴、联轴节、齿轮系啮合不好或存在松动	修复
3	机床运行时声音不好，有摆动现象	测速电动机换向器表面不光滑、不清洁，电刷与换向器间接触不良	清理或修整
		伺服放大部分速度环的功能不合适	调整
		伺服放大器位置环的增益问题	调节有关电位器
		位置检测器与联轴节间的装配松动	调整
		位置检测器测得的反馈信号的波形及D-A转换后的波形幅度错误	修理或更换
4	飞车现象（失控）	位置传感器或速度传感器的信号反相，或者是电枢线接反，整个系统不是负反馈而变成正反馈	重新接线
		速度指令给的不正确	修改速度指令
		位置传感器或速度传感器的反馈信号没有接或者是接线断开	重新接线
		CNC控制系统或伺服控制板有故障	维修或更换
		电源板有故障	维修或更换

（续）

序号	故障现象	故障原因	排除方法
5	轴均不运动	用户的保护性锁紧，如急停按钮、制动装置等没有释放，或有关运动的相应开关位置不正确	释放保护性锁紧装置或复位相关的开关位置
		主电源熔丝断了	更换
		过载保护用断路器动作或监控用继电器的触点未接触好	修理或调整接触
6	电动机过热	滑板运行时其摩擦力或阻力太大	修理
		热保护继电器脱扣，电流设定错误	修复或调整
		励磁电流太低或永磁式电动机失磁	修整电流或修复电动机
		切削条件恶劣，刀具的反作用力太大引起电动机电流增高	改善切削条件
		运动夹紧、制动装置没有充分释放，使电动机过载	释放夹紧、制动装置
		齿轮传动系的损坏或传感器有问题，所引起的振动进入伺服系统而引发的周期性噪声，可使电动机过热	修复或更换
		电动机本身内部短路	解除短路问题
		电动机冷却系统损坏	修复或更换
7	机床定位精度不准	滑板运行时的阻力太大	修复或调整
		位置环的增益或速度环的低频增益太低	调节增益值
		机械传动部分有反向间隙	调整间隙
		位置环或速度环的零点平衡调整不合理	调整零点
		接地、屏蔽不好或电缆布线不合理而使速度指令信号渗入噪声干扰和偏移	重新接线
8	零件加工表面粗糙	测速电动机换向器的表面光滑状况以及电刷的磨合状况不符合要求	修整或更换
		高频脉冲波形的振幅、频率及滤波形状不符合要求	调整

【知识拓展】

通过合理的管理，重视影响数控机床性能的要素，为这种高精度、高效益且又昂贵的设备提供良好的工作环境，进行正确的操作，给予恰当的维护，能确保其良好的工作性能，从而保证产品质量，充分发挥机床的效能，提高企业经济效益，促进企业可持续发展。某些数控机床制造商不够重视整体工艺与制造水平的提高，加工手段基本以普通机床与低效刀具为主，装配调试完全靠手工，加工质量在生产进度的紧逼下不能保证稳定。甚至有些数控机床制造商的生产管理依然沿用原始的手工台账管理方式，工艺水平和管理效率低下，使得企业无法形成足够大的生产规模。因此在机床研发时，应注意加强自身工艺技术改造和管理水平的提升。针对机床故障诊断中人工诊断效率低、实时性差、误差大的缺点，研究提出使用可靠性管理体系库进行机床故障诊断的方法。数控机床可靠性管理体系如图 7-2 所示。

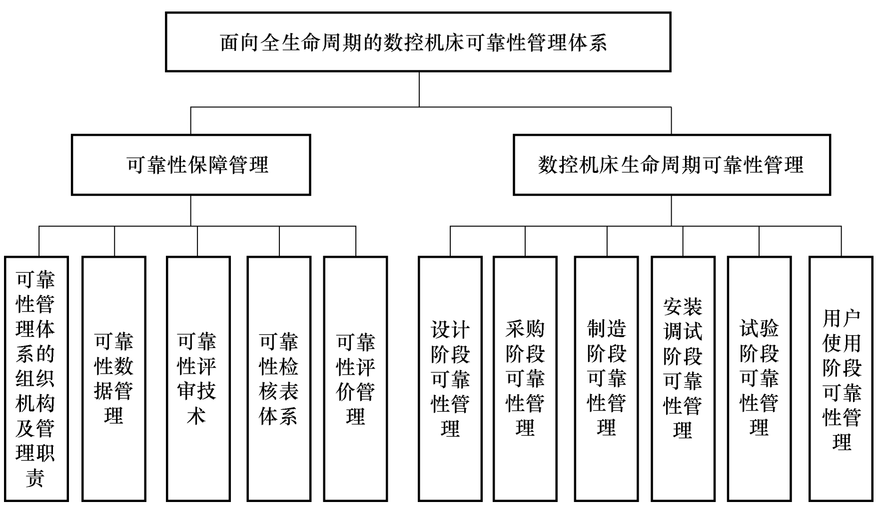


图 7-2　数控机床可靠性管理体系

【本章小结】

数控机床的应用越来越广泛，受重视程度也与日俱增，因此对其使用与维护管理也应当逐步走上更加规范的道路，从而确保数控机床使用寿命，提高生产效率。尽管结构和性能不同的数控系统存在一定的差别，但是对于数控机床管理是存在共性的。

在对数控机床进行管理时，可遵循以下一些原则：

1）数控机床的维护管理应当从企业的生产发展和经营目标出发，并以相关技术、组织措施等作为保证，因此这项工作是一项系统的工程。数控机床的管理包括了从选购、安装到使用、维修，甚至到报废的全过程。根据数控机床的特点，制定详细的操作流程和维修规范。严格记录数控机床的保养情况，包括保养时间、保养内容、保养方法等。认真做好故障修复的记录工作，记录内容包括故障现象、原因分析、排除方法等。

2）故障诊断时，应当先外部后内部的进行诊断；由外向内逐一检查，检查中要避免大

拆大卸，以免损害机床的性能；在对机床进行故障诊断时，应先对机械部分进行诊断，而后对电气部分进行诊断；机械故障容易察觉，而系统故障诊断更为复杂。因此，首先排除机械故障往往可以达到事半功倍的效果。

思考题与习题

7-1　如何加强和改进对数控机床的管理和维护，谈谈你的看法？

7-2　简述数控机床日常维护的要点。

7-3　简述数控机床的安装工作内容和步骤。

7-4　数控机床故障的分类有哪些，各有什么特点？

7-5　简述数控机床故障诊断的一般步骤。

7-6　数控机床的日常保养内容有哪些？

7-7　数控机床维修的基本要求是什么？

7-8　数控机床故障处理的一般原则是什么？试述数控机床故障排除的一般步骤？

7-9　简述数控车床主轴箱噪声大的原因和排除方法。

7-10　数控机床加工精度不稳定的原因。

7-11　加工中心换刀机构易发生的故障及排除办法。

7-12　数控系统的故障诊断方法有哪些？

7-13　试述元器件替代的原则。

7-14　CRT 不显示，可能的故障有哪些？

7-15　一台数控铣床出现“NOT READY”（没准备好）报警，如何排除故障？

7-16　如何排除数控机床参考点位置不对的故障？排除数控机床参考点位置不对的故障的方法有哪些？

7-17　一台数控机床主轴采用直流主轴伺服系统，运转时振动，试分析原因。

第 8 章　数控机床编程技术实验

实践性教学的设计思想是将理论教学成果用于指导实践，同时通过实践教学进一步巩固理论教学成果，锻炼学生实际动手能力，培养学生解决生产实际问题的能力和创新意识。本章的实践教学，是构建以“课程实验-课程设计－综合实践-科技创新实践”为特征的多层次递进式实践教学体系，通过课程实验－CAD/CAM 课程设计-机电一体化系统设计－CAD/CAM 与数控加工综合实践等递进式实践环节，为培养学生的综合能力和创新能力构建一个很好的教学平台。

8.1　拆装（认识）小型数控机床实验

1. 实验目的

1）了解数控机床的结构特点及其发展。

2）了解数控机床的加工对象、基本运动、基本操作及加工过程。

3）认识数控车床（或铣床）的部件组成和各部件之间相互的几何位置关系，并了解整机的几何精度要求。

2. 实验原理与说明：

数控机床的组成在前面章节已介绍，本实验不再赘述。

一台数控机床总有主运动——完成切削功能，和进给运动——形成工件的几何形状。因此，数控机床的机械部分是由主轴部件和各坐标方向的进给部件组成的。数控机床要求主轴部件可以变换不同的转速，传递足够的转矩。主轴变速通常是由变频电动机经变频器或伺服驱动器完成的（目前用齿轮副变速的已逐渐减少）。变频电动机带动主轴旋转，要求主轴具有很高的旋转精度，主轴端的径向圆跳动必须在 0.01mm 以下（国外机床达到 0.001mm）。数控机床主轴部件的发展趋势是把电动机与主轴合成一体（称为电主轴）。进给移动部件一般具有 X、Y、Z 三个坐标轴方向的运动。

为了保证被加工工件的几何精度，机床的主轴旋转中心线及各坐标的运动方向等几何位置必须达到一定的精度指标。三个坐标轴方向的运动必须相互垂直；主轴旋转轴线必须垂直于 X 坐标轴和 Y 坐标轴组成的平面或平行于 Z 坐标轴。

3. 实验设备与仪器

1）小型教学数控机床（车床或铣床）一台。

2）主轴检验棒一根。

3）百分表与磁力表架一套。

4）标准直角尺（200mm×150mm）一把。

5）平尺（250mm）一把。

6）活动扳手两把，木柄起子两把。

7）内六角扳手一套。

4. 实验内容与步骤

1）在教师指导下将一台小型数控机床拆成几个主要部件（如床身部件、刀架部件、尾座部件等），了解数控机床基本组成结构、各组成部分的作用。

2）然后再把它们重新组装回机床。

3）组装后再次检查几何精度（拆卸前要认真检查机床的几何精度），且应达到拆卸前的精度值。

5. 实验记录、数据处理及结论

1）实验名称及实验目的。

2）实验设备型号和生产厂家。

3）数控机床与普通机床在性能上有什么不同？

4）数控机床有哪几部分组成？

5）数控机床为保证达到高性能在结构上采取了哪些措施？

8.2　数控系统的原理及组成实验

1. 实验目的

1）了解数控系统的特点、基本组成和应用。

2）了解数控系统常用部件的原理及作用。

3）熟悉数控系统综合实验台，了解数控系统综合实验台的连接和基本操作。

2. 实验设备与仪器

1）SINUMERIK 840D 型数控系统。

2）专用连接线若干套。

3. 实验原理与说明

SINUMERIK 840D 是西门子公司 20 世纪 90 年代推出的高性能数控系统。它保持西门子前两代系统 SINUMERIK 880 和 840C 的三 CPU 结构：人机通信 CPU（MMC—CPU）、数字控制 CPU（NC—CPU）和可编程逻辑控制器 CPU（PLC—CPU）。三部分在功能上既相互分工，又互为支持。在物理结构上，NC—CPU 和 PLC—CPU 合为一体，合成在 NCU（numerical control unit）中，但在逻辑功能上相互独立。

作为世界上最紧凑的 CNC 系统之一，SINUMERIK FM—NC 的宽为 200mm，高 124mm，厚 110mm。而 SINUMERIK 840D，包括集成式可编程控制器（PLC）在内，把整个 CNC 缩小为单一模块，集成在驱动部件中，宽仅 50mm，尺寸小，使机床的配电柜更紧凑，而依然能提供强大功能。因此，配用此系统将降低数控机床的制造成本，加快制造周期。该系统还具有编程简易的优点，可简化对操作人员的培训要求。此外，SINUMERIK 840D 提供更高的测量系统分辨率，备有跟随误差补偿，因而提高了加工精度。

1）数控系统的组成。数控机床的组成在前面章节已介绍，如图 8-1 所示，本实验不再赘述。

2）SINUMERIK 840D 数控系统综合实验台的组成。SINMERIK 840D 数控系统的基本构

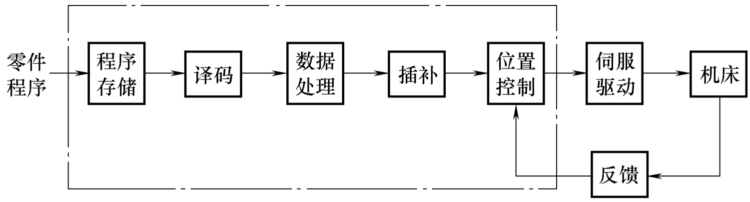


图 8-1　数控系统工作原理框图

成如图 8-2 所示，各部分之间的关系和连接方法如图 8-3 所示。

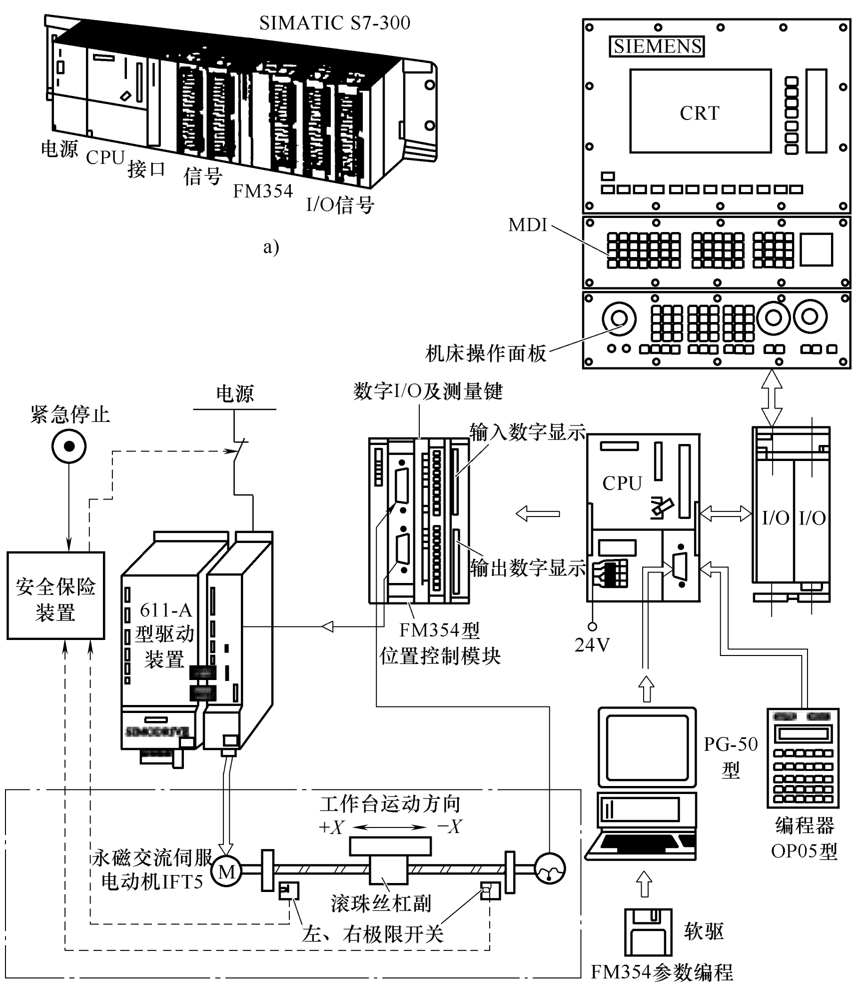


图 8-2　SINUMERIK 840D 数控系统的基本构成

SINUMERIK 840D 数控系统主要包括以下几部分：

1）数控单元电源。它主要提供 +5V、+15V、−15V、+24V、−24V 直流电源，用于各板的供电，其中 24V 直流电源，用于单元内继电器控制。

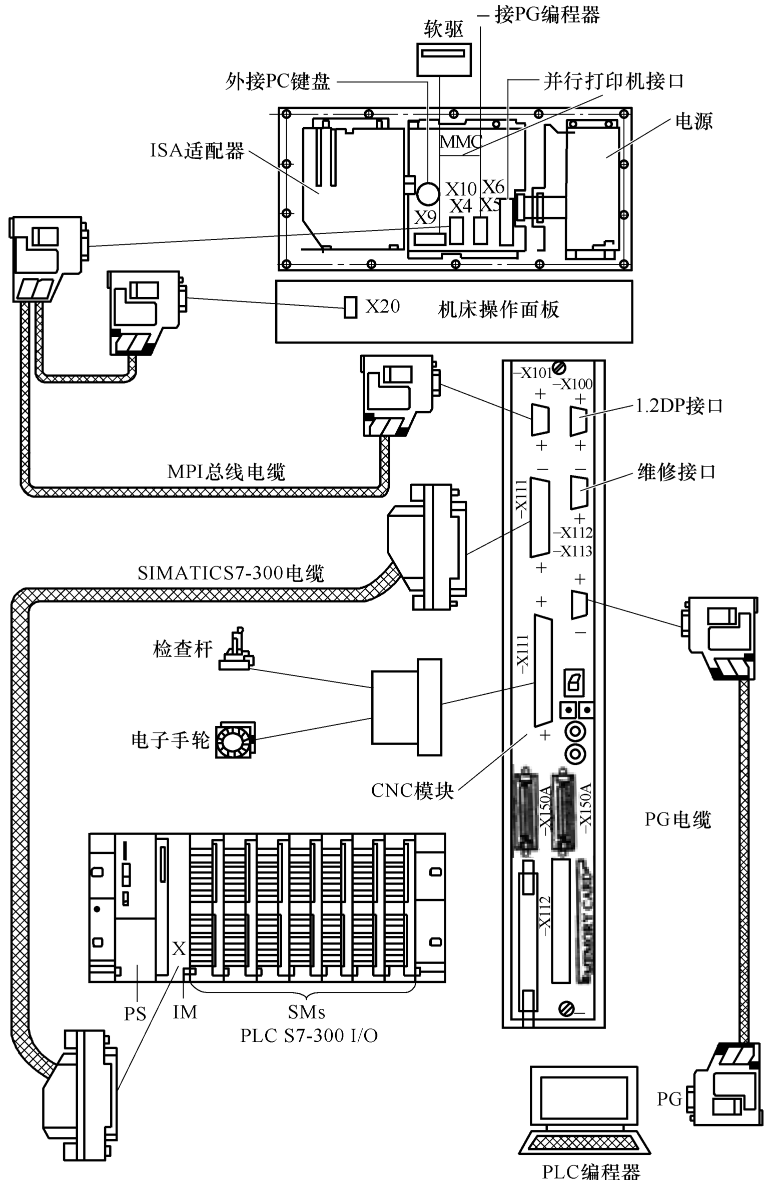


图 8-3　SINUMERIK 840D 各部分之间的关系和连接方法

2）主电路板。主电路板应用模块式组合，连接各功能板、故障报警等。主 CPU 在该板上，用于系统主控。

3）基本轴控制板。它提供 X、Y、Z 和其他轴的进给指令，接收从 X、Y、Z 和其他轴位置编码器反馈的位置信号。

4）存储器板。它接收系统操作面板的键盘输入信号，提供串行数据传送接口，手摇脉冲发生器接口，主轴模拟量和位置编码器接口，存储系统参数，刀具参数和零件加工程序等。

5）伺服系统。它由 FM354 和 SPWM、SIMODRIVE611、IFK6/IFT6/IFT5D 等组成，以

实现对机床的运动控制。

6）位置检测系统。它采用增量直线位移测量元件，以实现机床的闭环检测。

7）操作面板。它使用全数控键盘布局。

8）机床控制面板。其按钮使用图形符号，使操作更加容易。

9）显示器。选用 10.4in 彩色显示器，便于观察机床运行状态。

10）I/O 接口。通过 2 个 RS232C 和 RS444/485 接口实现与外部设备的连接。

4. 实验内容

（1）感性认识数控系统综合实验台的各组成部分

1）指出数控系统综合实验台的各个组成部件及其原理或作用。

2）了解数控系统综合实验台各个组成部件之间的连接，认清各个信号线的来源和去向。

（2）了解数控系统综合实验台的基本操作　了解数控系统综合实验台上电顺序；了解数控车床数控装置的基本操作。进入数控系统，运行演示程序。

5. 实验记录、数据处理及结论

1）简述数控系统的组成及原理。

2）列举一些数控系统应用的实例。

3）画出数控系统综合实验台的结构框图。

4）列举数控系统综合实验台的主要部件，并简述其作用。

5）简述数控系统综合实验台的连接及基本操作。

8.3　数控插补原理实验

1. 实验目的

1）通过实验，使学生了解数控插补原理以及实现方法。

2）通过数控插补算法的可视化，使学生熟悉常用插补算法。

3）通过实验，应用标准 G 代码编程实现直线插补和圆弧插补，掌握标准 G 代码的直线插补和圆弧插补编程方法。

2. 实验仪器与设备

1）数控插补原理实验教学软件。

2）计算机。

3. 实验原理及说明

机床数控系统依据一定方法确定刀具运动轨迹，进而产生基本轮廓曲线，如直线、圆弧等。其他需要加工的复杂曲线由基本轮廓去逼近，这种拟合方式称为“插补”，插补的实质是数控系统根据零件轮廓线型的有限信息在轮廓的已知点之间确定一些中间点，完成所谓的“数据密化”工作。

1）基本概念。数控系统所加工零件的轮廓或刀具的运动轨迹一般由直线或圆弧组成，对于一些复杂曲线，通常用直线或圆弧去逼近。数控系统的插补原理（或插补方法）就是根据给定的进给速度和给定零件轮廓的要求，在轮廓的已知点之间确定一些中间点，计算出各点的坐标，再根据计算结果向各个坐标轴发出进给指令，这样就可将零件的轮廓描述

出来。

2）插补算法。插补的类型很多，根据产生的数学模型来分，有直线插补、二次曲线插补等；根据插补计算输出的数值形式来分，有基准脉冲插补（又称脉冲增量插补）和数据采样插补（又称数字增量插补或时间标量插补）。其中，脉冲增量插补的方法包括逐点比较法、最小偏差法、数字积分法、目标点跟踪法、单步追踪法等；数据采样插补的方法包括直线函数法、数字积分法（DDA）、二阶近似法、双 DDA 法、角度逼近法等。这些算法大多是针对圆弧插补设计的，其基本思想都是用直线段（内接弦线、内外均差弦线、切线）来逼近圆弧。

3）逐点比较法。逐点比较法是脉冲增量插补最典型的代表，它是一种最早的插补算法，其基本思想是以折线来逼近曲线（包括直线）。逐点比较法的原理是：CNC 系统在控制过程中，能逐点地计算和判别运动轨迹与给定轨迹的偏差，并根据偏差控制进给轴向给定轮廓靠拢，以缩小偏差，使加工轮廓逼近给定轮廓。具体地说，就是根据偏差决定进给轴下一步的走向，如果加工点走到加工轮廓外面去了，那么进给轴下一步就要向加工轮廓里面走；如果加工点在加工轮廓里面，那么进给轴下一步就要向加工轮廓外面走。每次插补的结果仅产生一个单位的行程增量（一个步距），以一个一个步距（脉冲当量）的方式输送给电动机。

4）直线函数法。直线函数法是数据采样插补的代表方法，其基本思想是用一系列首尾相连的微小直线段来逼近给定的曲线（包括直线）。直线函数法的原理是：插补程序以一定的时间间隔，即插补周期定时运行，在每个周期内根据进给速度计算出各坐标轴在下一插补周期内的位移增量（数字量）。这种算法的核心问题是计算各坐标轴的位移增量 AX 或 AY（而不是单个脉冲），通过前一插补周期末的动点位置和本次插补周期内的位移增量算出本次插补周期末的动点命令位置。

5）直线和圆弧的 G 代码插补指令。目前，数控系统常用的是字地址程序段格式，国家标准 GB 8870—88 推荐使用字地址程序段格式。字地址程序段实现直线和圆弧运动的指令是通过 G 代码实现的。

4. 实验内容与步骤

（1）实验内容

1）基准脉冲插补。

① 逐点比较插补法。具体内容为插补第 Ⅰ 象限直线，起点坐标（0，0），终点坐标（4，6）。实验要求为将计算结果和插补轨迹与实验结果比较，若不相同，找出原因。

② 数字积分插补法。具体内容为插补第 Ⅰ 象限逆时针方向圆，起点坐标（10，0），终点坐标（0，10），寄存器 4 位。实验要求，对半加载、全加载和左移规格化选项进行选择设定，修改寄存器位数，分别重新插补，查看插补结果，分析 3 种选项和寄存器位数对插补结果的影响。

2）数据采样插补法。

① 直线插补。具体内容为用直线函数法插补第 Ⅰ 象限直线，起点坐标（0，0），终点坐标（30，50）。

② 圆弧插补。具体内容为分别使用“直线函数法”“数字增量式 DDA 法”“扩展数字增量式 DDA 法”进行运算，插补第 Ⅰ 象限逆时针方向圆，起点坐标（50，0），终点坐标（0，50）。

（2）实验步骤

1）熟悉和使用数控插补教学软件。

以逐点比较法直线插补和逐点比较法圆弧插补为例，数控插补原理实验教学软件的操作方法基本如下。

① 逐点比较法直线插补。

第一步：在软件初始界面插补类型选择框中选择逐点比较法。

第二步：输入所需要插补直线的终点参数 X 和 Y 值。

第三步：单击“画线型”按键可以画出所给定的直线。

第四步：此时可以进行插补，单击插补按钮，可插补出给定的直线。

第五步：改变“参数演示”中“步距”的大小，分析此项参数对插补精度的影响。

② 逐点比较法圆弧插补。

第一步：在插补类型选择框中选择逐点比较法圆弧插补。

第二步：在相应的圆弧参数中选择合适的插补方式和演示方式。

第三步：单击“画线型”按键，画出给定参数的圆弧。

第四步：选择好插补方式顺圆插补或逆圆插补，点击插补按键进行插补。

2）编写逐点比较法直线插补程序，理解插补原理。

3）利用完成的插补子程序，调用运动控制器提供的函数库和动态链接库，在运动开发平台上实现逐点比较法直线插补的伺服控制。

5. 实验记录、数据处理及结论

1）简述常用的插补算法。

2）画出实现逐点比较法直线插补的流程图，结合流程图说明如何实现任意象限的直线插补。

3）分析在“数字积分法”插补中，寄存器位数及半加载、全加载、左移规格化等选项对插补结果的影响。

4）分析用“数据采样法”进行插补时，插补周期 T 值和进给速度 F 值的变化对插补精度的影响。

8.4　数控代码手工编程仿真模拟实验

1. 实验目的

掌握 SINUMERIK 840D 编程规则及数控仿真系统的操作方法；熟练对刀操作；了解手工编程工艺参数的确定，并能正确计算程序中所需数据；可以按要求选择零件图，根据系统的编程规则，正确编制程序并在模拟软件上运行，加工出合格零件。

2. 实验原理与说明

手工编程是指用人工的方法完成从零件图到编写程序单，最后制作出控制介质的整个过程。流程如图 8-4 所示。



图 8-4　手工编程的流程

手工编程由人工完成整个编程过程，包括许多数据计算，因此只适用于一些轮廓形状不太复杂的零件，或者坐标计算较为简单、程序编制易于实现的场合。对于轮廓形状复杂的零件，如含有非圆曲线的零件，一般采用自动编程的方法。

3. 实验设备与仪器

数控仿真系统。

磁盘介质。

4. 实验内容、方法与步骤

手工编程时，应按照机床规定的程序格式，逐行写出刀具的每一运动行程以及加工中所需的工艺参数。编程步骤如下：

1）工艺设计。编程时必须全面了解和掌握零件的整个加工过程及其涉及的有关工艺参数。

① 分析零件图。首先要熟悉零件所属产品的性能、用途和工作条件，了解其装配关系。然后分析零件图上各项技术要求是否合理，零件的结构工艺性如何等。

② 确定加工工艺路线。

③ 选择切削用量。

④ 选择或设计夹具。

2）设定加工起点。确定加工开始点。

3）数值计算，一般包括基点和节点的计算，刀具中心轨迹的计算等。

4）编写程序单。按照机床规定的程序格式编写程序单。

5）制作控制介质。将程序信息记录在磁盘上，也可直接输入到数控机床上。

6）校验程序。通过机床空运动、图形显示模拟加工轨迹或试切零件来校验程序。

5. 实验记录、数据处理及结论

1）简述手工编程的步骤。

2）编写指定零件的加工程序。

3）记录程序在数控仿真系统上的仿真情况。

8.5　利用 MasterCAM 软件自动编程加工实验

1. 实验目的

1）了解数控机床自动编程软件的特点，掌握使用自动编程软件对复杂零件进行编程的方法。

2）了解计算机和数控机床之间程序的传输方法。

3）熟悉 MasterCAM 软件的使用方法。

4）掌握自动生成的程序与数控机床的连接方法。

2. 实验设备与仪器

1）装有 MasterCAM9.0 软件的计算机。

2）装有 SINUMERIK 840D 的数控机床或者加工中心。

3）卡尺等测量工具、零件毛坯（硬铝块 100mm × 100mm）、刀具若干。

3. 实验原理与说明

MasterCAM 软件分为 CAD 和 CAM 两部分，可用 CAD 部分在计算机上进行零件的二维或三维图形设计，然后在 CAM 中选择适当的加工模块，根据工艺要求设置相应的刀具参数和特性参数，生成刀具路径文件，再通过后置处理程序生成数控文件，即数控机床能够识别的 G 代码，然后进行适当的编辑和修改，传输给装有 SINUMERIK 840D 的数控机床或者加工中心，装上相应的刀具，便可进行各种不同类型的加工。它取代了繁琐而复杂的编程工作。不仅大幅度提高了工作效率和加工精度，而且大大地节省了资源和产品成本，减少了开发新产品的时间。

4. 实验内容与步骤

MasterCAM 软件可以实现平面或曲面零件的造形，进行加工工序及相关参数的设置，生成加工轨迹，完成该零件的模拟加工，生成后置数控代码，通过记忆卡或数据线传输到数控机床，数控机床对刀以后读取所接受的 NC 代码文件并执行，从而自动加工出所需要的零件。自动编程流程如图 8-5 所示。

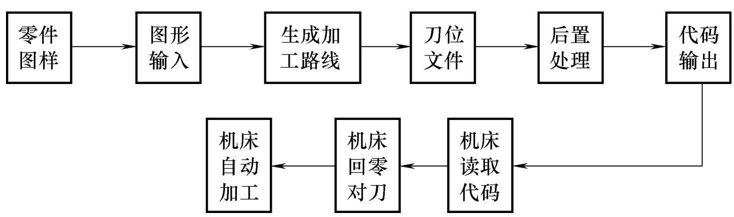


图 8-5　自动编程流程

1）将学生分组。

2）每组选取一个图形进行造形。

3）每组每人一台计算机，采用 CAM 软件进行造形，正确设置参数，生成数控程序。

4）将数控程序输入数控机床或加工中心。

5）正确选择刀具，进行对刀操作，从而完成零件的自动加工。

5. 实验记录、数据处理及结论

1）将通过 MasterCAM 实现的图形及其相应的加工程序记录下来。

2）简述 MasterCAM 自动编程的方法与步骤和数控机床与加工中心的加工操作方法。

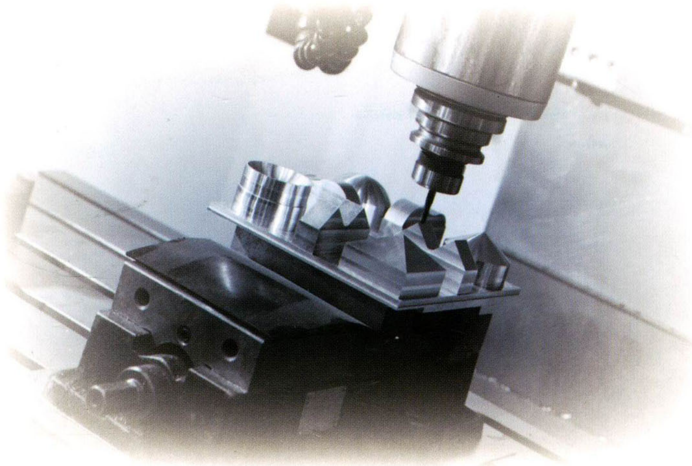
3）记录加工工件的形状和尺寸。

参 考 文 献

［1］魏杰．数控技术及其应用［M］．北京：机械工业出版社，2013.
［2］梅雪松．机床数控技术［M］．北京：高等教育出版社，2013.
［3］闻邦椿．机械设计手册（工业机器人与数控技术）［M］．北京：机械工业出版社，2015.
［4］易红．数控技术［M］．北京：机械工业出版社，2007.
［5］郑堤．数控机床与编程［M］．北京：机械工业出版社，2007.
［6］黄庆专，刘杰．数控技术［M］．西安：西北工业大学出版社，2015.
［7］蒲志新．数控技术［M］．北京：北京理工大学出版社，2014.
［8］林宋，白传栋．现代数控机床及控制［M］．北京：化学工业出版社，2015.
［9］廖效果．数字控制机床［M］．武汉：华中科技大学出版社，2008.
［10］韩建海．数控技术及装备［M］．武汉：华中科技大学出版社，2007.
［11］杜国臣，王士军．机床数控技术［M］．北京：机械工业出版社，2011.
［12］王永章．数控技术［M］．北京：高等教育出版社，2001.
［13］严育才，张福润．数控技术［M］．北京：清华大学出版社，2012.
［14］朱晓春．数控技术［M］．北京：机械工业出版社，2001.
［15］逯晓勤，李海梅．数控机床编程技术［M］．北京：机械工业出版社，2002.
［16］张洪江，侯书林．数控机床与编程［M］．北京：北京大学出版社，2009.
［17］王彪，张兰．数控加工技术［M］．北京：中国林业出版社，2006.
［18］詹华西．数控加工与编程［M］．西安：西安电子科技大学出版社，2007.
［19］陈为国．FANUC Oi 数控车削加工编程与操作［M］．沈阳：辽宁科学技术出版社，2010.
［20］孙志永，赵砚江．数控与电控技术［M］．北京：机械工业出版社，2002.
［21］王卫兵．MasterCAM 数控加工实例教程［M］．北京：清华大学出版社，2006.
［22］蔡长韬，胡光忠．计算机辅助设计与制造［M］．重庆：重庆大学出版社，2013.
［23］段辉，刘建华，成红梅，等．MasterCAM X5 中文版实例教程［M］．北京：机械工业出版社，2011.
［24］蒋洪平．数控设备故障诊断与维修［M］．北京：北京理工大学出版社，2006.
［25］吴祖育，秦鹏飞．数控机床［M］．上海：上海科学技术出版社，2000.
［26］杨中力．数控机床故障诊断与维修［M］．大连：大连理工大学出版社，2006.
［27］韩鸿鸾．基础数控技术［M］．北京：机械工业出版社，1999.
［28］宋建武，曹志宏．数控技术基础与应用［M］．北京：北京大学出版社，2004.
［29］宋本基，张铭钧．数控加工［M］．哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2000.
［30］徐衡．数控机床维修［M］．沈阳：辽宁科学技术出版社，2005.
［31］李艳霞．数控机床及应用技术［M］．北京：人民邮电出版社，2009.
［32］杨海琴，侯先勤．数控机床维修与维护实训精讲［M］．西安：西安交通大学出版社，2011.
［33］何龙．数控设备调试与维护［M］．成都：西南交通大学出版社，2006.
［34］赵斌，孙兵．数控机床的故障诊断技术及维护［J］．现代机械，2003（3）：85-86.

[35] 张根保，罗静．数控机床可靠性工程的实施［J］．现代机械，2016（9）：5-10.
[36] 王爱玲．现代数控原理及控制系统［M］．北京：国防工业出版社，2005.
[37] 任玉田．机床计算机数控技术［M］．北京：北京理工大学出版社，2005.
[38] 李斌，李曦．数控技术［M］．武汉：华中科技大学出版社，2010.
[39] 廖慧勇．数控加工技术实训教程［M］．成都：西南交通大学出版社，2007.
[40] 刘书华．数控机床与编程［M］．北京：机械工业出版社，2015.

登陆机械工业出版社教育服务网
您还可以选择如下教材辅助学习
www.cmpedu.com



NC Machining Technology

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版

机工教育微信服务号

● ISBN 978-7-111-57337-1
● 策划：余皞 / 封面设计：张静

ISBN 978-7-111-57337-1
9 787111 573371 >
定价：40.00元